

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI TŘÍFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
BRNO 2014

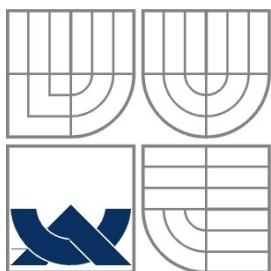
Bc. Stanislav Vinkler



ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

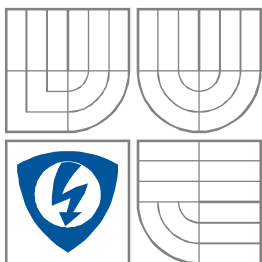
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Vysoké učení technické v Brně



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI TŘÍFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

THE IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE

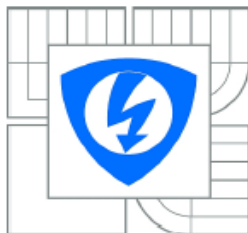
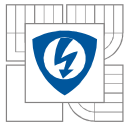
AUTHOR

Bc. Stanislav Vinkler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vítek Ph. D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Stanislav Vinkler
Ročník: 2

ID: 73070
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Zvyšování účinnosti třífázových asynchronních motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na zadaném vzorku asynchronního motoru proveďte měření a analyzujte výsledky v souladu s normou EN 60034-2-1.
2. Srovnajte parametry motoru zjištěné zjednodušeným analytickým výpočtem, výpočtem v programu RMXprt a měřením, posuďte příčiny chyby výpočtu.
3. Aplikujte opatření pro zvýšení účinnosti motoru navržená v semestrálních projektech. Zejména dvouvrstvé vinutí se zkráceným krokem, změna počtu rotorových drážek, měděná klec rotoru. Proveďte výpočet v programu RMXprt a zhodnoťte vliv těchto úprav na ztráty a účinnost motoru.
4. Připravte dokumentaci pro realizaci vybraných opatření pro zvýšení účinnosti zadaného motoru.
5. Na dodaném laboratorním vzorku proveďte měření, analyzujte dosažené parametry motoru, srovnajte s vypočtenými. Zhodnoťte chybu výpočtu a navrhnete další perspektivní opatření pro zvýšení účinnosti tohoto asynchronního motoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Boldea, I., Nasar, S.A. The Induction Machine Handbook. USA: CRC Press, 2002. ISBN 978-0849300042
- [2] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.
- [3] Petrov, G.N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia. 1982.
- Dále dle pokynu vedoucího práce.

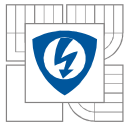
Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
Předseda oborové rady



Abstrakt

Tato práce se věnuje návrhu zvýšení účinnosti konkrétního asynchronního motoru, který byl před touto změnou podroben laboratornímu měření dle normy EN60034-2-1, analytickému výpočtu ztrát a celkové účinnosti, a analýze v programu RMxpert.

Úvodní část práce je zaměřena na rozbor dat z měření, vyčíslení dílčích ztrát ve stroji a celkové účinnosti.

Ve druhé kapitole jsou ztráty a účinnost vypočteny analyticky, v prvním případě s využitím vztahů dle odborné literatury zabývající se návrhem elektromotorů a ve druhém případě za pomoci programu pro rychlý návrh točivých elektrických strojů, tj. programem RMxpert. V závěru této kapitoly jsou všechny parametry získané měřením a výpočty porovnány.

Třetí kapitola je zaměřená na výpočet ztrát a výsledné účinnosti stroje v počítačovém programu, ve kterém jsem postupně aplikoval změny pro zvýšení účinnosti elektrického stroje. Je zde také uveden výpočet nových rozměrů satorových a rotorových drážek.

Ve čtvrté kapitole je zpracována dokumentace pro výrobu nového dvouvrstvého vinutí pro stávající stroj, při zachování původních rozměrů drážek satoru.

Poslední část práce se věnuje analýze dat z měření na dodaném asynchronním motoru s nově navrženým satorovým vinutím. V závěru jsou potom diskutovány dosažené výsledky práce.

Abstract

This work is dedicated to increasing the effectiveness of a particular draft induction motor, which was before the change and subjected to laboratory measurements according to EN60034 - 2-1, an analytical calculation of the losses and the overall efficiency and analysis program RMxpert.

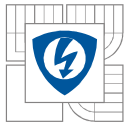
The first part focuses on the analysis of measurement data, measurement of partial loss in the machine and overall efficiency.

In the second chapter, losses and efficiency calculated analytically, in the first case using the links in the professional literature dealing with the design of electric motors and in the second case by a program for the rapid design of rotating electrical machines, RMxpert program. At the end of this chapter all parameters are obtained measurements and calculations are compared.

The third chapter is devoted to the calculation of losses and the resulting efficiency machines in a computer program, in which I gradually adopted changes to increase the efficiency of electrical machines. It also shows the calculation of the new dimensions of the stator and rotor slots.

In the fourth chapter, the preparation of documentation for the production of a new two-layer winding for the current machine, while preserving the original dimensions of stator slots.

The last part is devoted to the analysis of measurement data on the supplied asynchronous motor with a newly designed stator winding. In conclusion then discussed the results of work.

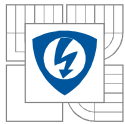


Klíčová slova

Přímé měření; nepřímé měření; ztráty; účinnost; analytický výpočet; program RMxpert; statorové vinutí; statorové drážky; rotorové drážky; materiál; klec rotoru.

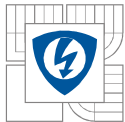
Keywords

Direct measurement; indirect measurement; losses; efficiency; analytic calculation; program RMxpert; stator winding; stator slots; rotor slots; material; cage rotor.



Bibliografická citace

VINKLER, S. Zvyšování účinnosti třífázových asynchronních motorů, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 67 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.



Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Zvyšování účinnosti třífázových asynchronních motorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

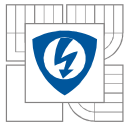
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
ÚVOD	9
1 MĚŘENÍ NA STÁVAJÍCÍM ASYNCHRONNÍM MOTORU	10
1.1 POPIS ZAŘÍZENÍ ZKUŠEBNY	10
1.2 PARAMETRY Z PŘÍMÉHO MĚŘENÍ	11
1.3 PARAMETRY Z NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ.....	13
1.3.1 Určení velikosti konstantních ztrát.....	13
1.3.2 Určení velikosti ztrát při zatížení.....	15
1.3.3 Určení přídatných ztrát při zatížení	18
2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ÚČINNOSTI ZADANÉHO MOTORU	20
2.1 ZTRÁTY VE STATOROVÉM VINUTÍ	20
2.2 ZTRÁTY V ŽELEZE STATORU	23
2.3 ZTRÁTY V KLECI ROTORU	24
2.4 MECHANICKÉ ZTRÁTY.....	25
2.5 PŘÍDATNÉ ZTRÁTY PŘI ZATÍŽENÍ.....	26
2.6 STANOVENÍ ÚČINNOSTI.....	26
2.7 VÝPOČET ASYNCHRONNÍHO MOTORU V PROGRAMU RMXPT	26
2.8 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALYTICKÝCH VÝPOČTŮ	30
3 APLIKACE NAVRHOVANÝCH ZMĚN PRO ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI.....	31
3.1 POUŽITÍ DVOUVRSTVÉHO VINUTÍ	31
3.1.1 Analýza rozměrů statorové drážky	32
3.2 ZMĚNA POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ	34
3.3 ZMĚNA MATERIÁLU MAGNETICKÉHO OBVODU	37
3.4 ANALÝZA POMOCÍ 3D MODELU V PROGRAMU MAXWELL 3D	38
4 DOKUMENTACE PRO REALIZACI DVOUVRSTVÉHO VINUTÍ.....	41
5 MĚŘENÍ NA MOTORU S DVOUVRSTVÝM VINUTÍM.....	46
5.1 PARAMETRY Z PŘÍMÉHO MĚŘENÍ	46
5.2 URČENÍ VELIKOSTI KONSTANTNÍCH ZTRÁT.....	47
5.3 URČENÍ ZTRÁT PŘI ZATÍŽENÍ	50
5.4 URČENÍ PŘÍDATNÝCH ZTRÁT PŘI ZATÍŽENÍ A URČENÍ ÚČINNOSTI Z NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ	54
5.5 ZHODNOCENÍ DÍLČÍCH MĚŘENÍ MOTORŮ.....	54
6 ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
PŘÍLOHY	59



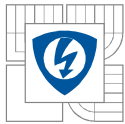
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1 – Schematické zapojení přístrojů v laboratoři.....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 1.2 – Měřicí pracoviště s popisem přístrojů u prvního měření.....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 1.3 – Štítkové hodnoty měřeného stroje</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2.1 – Rozměry statorového vinutí</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2.2– Nadeřinování rozměrů statoru a rotoru</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 2.3 – Postup vytvoření vinutí statoru v modelu stroje</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3.1 – Rozměry navrhované drážky statoru.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 3.2 – Nové rozměry rotorové drážky pro různý počet tyčí klece.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3.3 – Modely strojů pro analýzu v programu Maxwell 3D.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 4.1– Schéma zapojení dvouvrstvého vinutí [z editoru programu RMxpert].....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 4.2– Schéma dvouvrstvého vinutí pro výrobu</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 5.1 – Dvouvrstvé statorové vinutí na dodaném vzorku</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 5.2 – Stabilizace příkonu před zahájením měření naprázdno [z programu M-Test7]</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.3 – Odpor vinutí po zkoušce naprázdno</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.4 – Velikost ztrát ventilací a třením</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 5.5– Odpor statorového vinutí po teplotní stabilizaci stroje</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 5.6 – Velikost odporu statorového vinutí při známém zatěžovacím momentu</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 5.7– Závislost velikosti ztrát v železe na napětí</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 5.8– Porovnání velikostí jednotlivých ztrát, kromě ztrát ve vinutí</i>	<i>55</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Parametry z přímého měření.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabulka 2 – Parametry pro určení ztrát v železe</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3 – Naměřené hodnoty odporu statorového vinutí po zkoušce jmenovitým zatížením</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 4 – Parametry ze zkoušek křivek zatížení</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 5 – Parametry pro výpočet zbytkových ztrát při prvním měření</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 6 – Parametry pro výpočet zbytkových ztrát při druhém měření</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 7 – Naměřené hodnoty statorových vinutí.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 8 – Parametry elektrického stroje</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 9 – Parametry z analýzy programu RMxpert.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 10 – Parametry z analýzy RMxpert stroje s nově navrženou drážkou</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 11 – Parametry elektrického stroje s různým počtem rotorových tyčí.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 12 – Parametry reálných motorů a 3D modelů.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 13 – Zapojení dvouvrstvého vinutí</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 14 – Varianty návrhů průměrů vodičů dvouvrstvého vinutí.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 15 – Parametry z přímého měření na motoru s dvouvrstvým vinutím na statoru</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 16 – Parametry měření naprázdno.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 17 – Parametry pro zjištění ztrát v železe</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 18 – Parametry z měření křivky zatížení</i>	<i>52</i>



ÚVOD

Protože jsou elektrické motory jedním z největších spotřebitelů elektrické energie (podle literatury [11] představují až 65% spotřeby), je snahou výrobců konstruovat takovéto stroje s pokud možno co nejvyšší účinností. Ta je definována pro elektrické stroje, jako poměr mechanického výkonu, jenž je z těchto strojů odváděn z rotující hřídele, k elektrickému příkonu, který je do stroje dodáván. Aby bylo ujednoceno měření účinnosti takového stroje v rámci zemí, které se zavázaly dodržovat normy vydané Evropským výborem pro normalizaci (CEN), musí každý výrobce elektrických strojů provést měření podle platné normy EN60034-2-1. Na základě tohoto měření může svůj stroj prodávat v různých třídách účinností (IE-1 až IE-4), podle přesně stanovených velikostí účinností, v závislosti na výstupním výkonu stroje a na počtu pólů stroje.

Tato práce si klade za cíl analyzovat měřením, výpočtem a simulací velikost dílčích ztrát v konkrétním elektrickém stroji (asynchronní motor TM90-2L, firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna) a vyčíslení výsledné účinnosti. V dalším kroku pak navrhnout opatření, které povede ke zvýšení účinnosti stroje a měřením dle výše uvedené normy se zpětně přesvědčit, zda toto opatření vedlo ke zvýšení hodnoty účinnosti.

V první kapitole je popsáno měření dle normy EN60034-2-1 a data z tohoto měření jsou podrobena výpočtu dílčích ztrát a výsledné účinnosti.

Druhá kapitola je zaměřena na vyčíslení parametrů analytickým výpočtem a na výpočet v programu RMxpert, ve kterém byly zadány stávající parametry stroje. Dále jsou zde porovnány parametry naměřené na reálném stroji s parametry vypočtenými analyticky.

Třetí kapitola je věnována aplikaci změn ve stroji, které vedou ke zvýšení účinnosti, přičemž výpočet důležitých parametrů je prováděn pouze za pomoci programu RMxpert.

Ve čtvrté kapitole je vypracována technická dokumentace pro výrobu dvouvrstvého vinutí, včetně návrhů průměrů vodičů.

V poslední páté kapitole je provedeno opětovné měření podle výše uvedené normy a výsledky měření jsou porovnány s parametry před změnou, která byla provedena pro zvýšení účinnosti.

Závěr práce je věnován rozboru dílčích kapitol, z hlediska rozdílu velikosti vypočtených, nebo naměřených ztrát ve stroji a velikosti výsledné účinnosti. Dále je zde zmíněna výsledná konfigurace jednotlivých částí stroje, která by vedla k nejvyšší dosažené účinnosti podle výsledků měření i podle analýzy programu RMxpert.

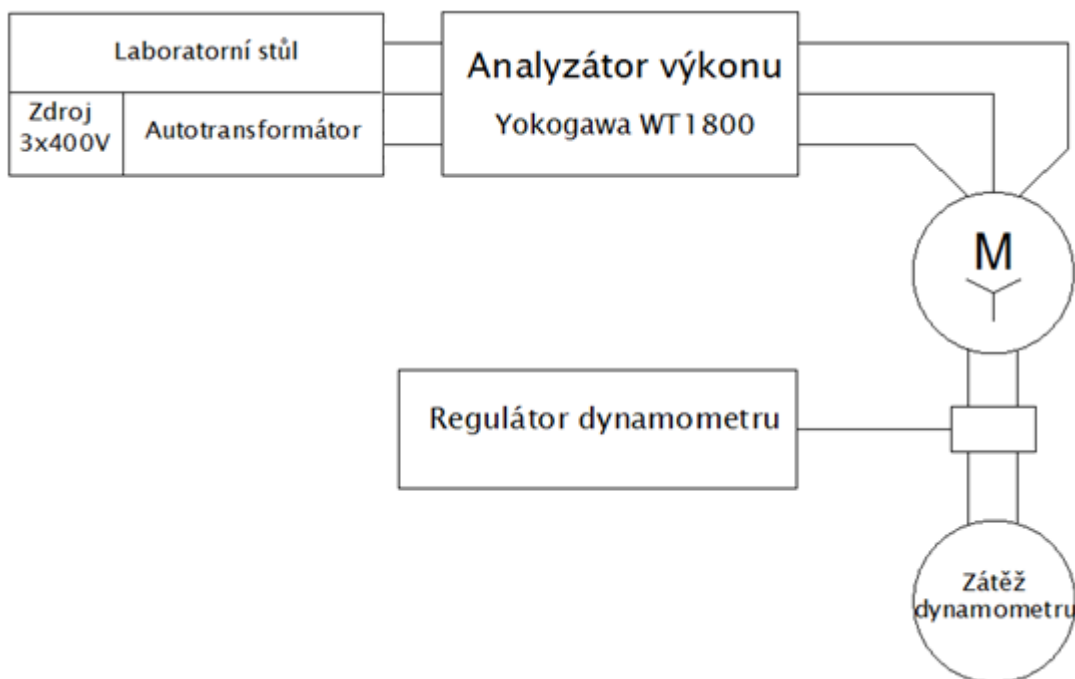
1 MĚŘENÍ NA STÁVAJÍCÍM ASYNCHRONNÍM MOTORU

Po nastudování normy EN 60034-2-1 jsem s ohledem na typ měřeného stroje a zařízení zkušebny provedl měření, ze kterých byla stanovena účinnost zadaného stroje. Ze seznamu přednostních metod měření pro asynchronní motory jsem zvolil přímé měření, tj. stanovení mechanického výkonu stroje na hřídeli při současném měření příkonu.

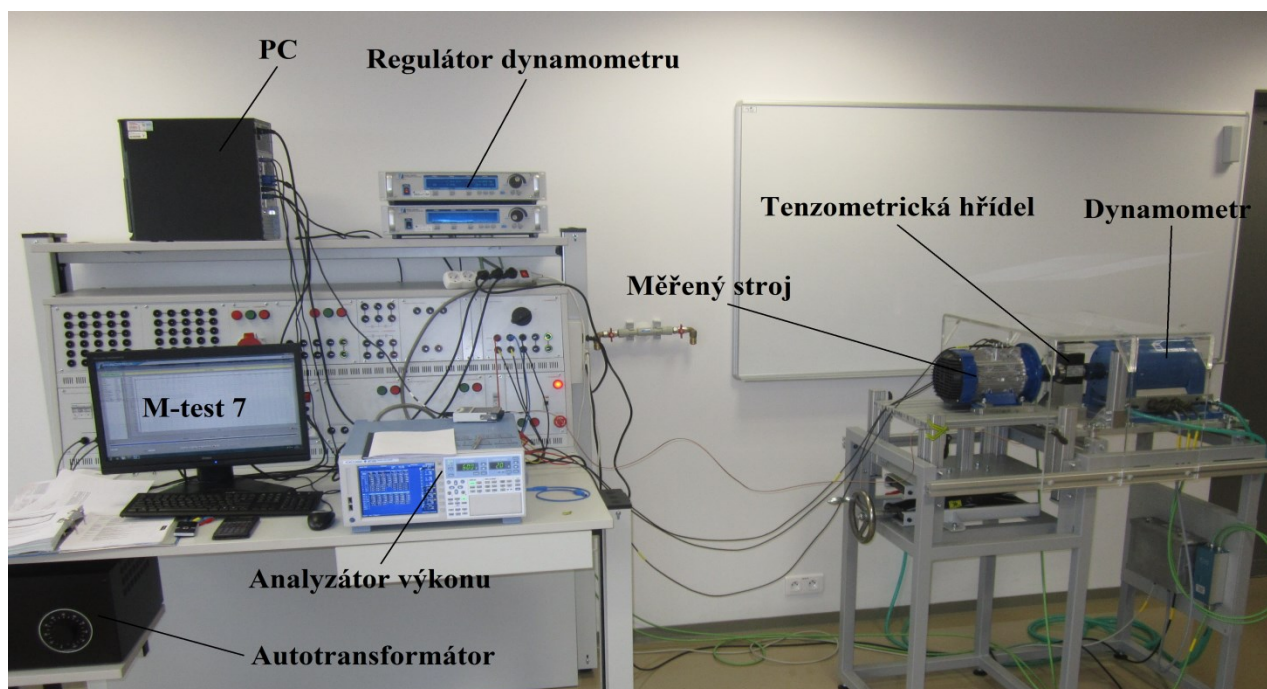
Dále bylo provedeno nepřímé měření, tj. stanovení jednotlivých ztrát ve stroji za určitých podmínek (chod stroje naprázdno, chod stroje při jmenovitém a zvýšeném zatížení).

1.1 Popis zařízení zkušebny

Vlastní měření probíhalo ve dvou etapách, kdy v prvním měření byla k dispozici laboratoř VUT, vybavena laboratorním stolem pro regulaci napájení stroje (autotransfornátor), analyzátozem výkonu Yokogawa WT 1800, dynamometrem TMHS 307/111 (výrobce Magtrol), mikroohmmetrem Cropico DO 5001. Všechny tyto měřicí přístroje, vyjma mikroohmmetru byly propojeny s PC, na kterém byly všechny měřené parametry zpracovávány v softwaru firmy Magtrol (M-Test 7). Schematické a skutečné zapojení jednotlivých přístrojů v laboratoři, společně s měřeným strojem je vyobrazeno na Obrázku. 1.1 a 1.2.



Obrázek 1.1 – Schematické zapojení přístrojů v laboratoři



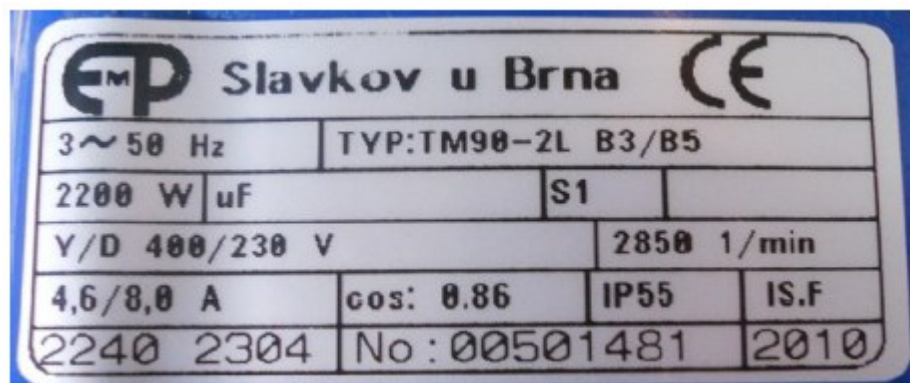
Obrázek 1.2 – Měřicí pracoviště s popisem přístrojů u prvního měření

Jelikož po prvním měření vykazovala analyzovaná data značnou odchylku, což bylo způsobeno nemožností nastavení požadovaných hodnot napájecích napětí pro různé stavy stroje a chybou měření odporu vinutí použitým mikroohmmetrem, bylo provedeno druhé měření, kde na místo autotransformátoru bylo použito pro napájení asynchronního motoru spínaného zdroje. Ten umožňoval plynule regulovat velikost vstupního napětí v požadovaných parametrech, zejména při měření naprázdno, kdy má být stroj napájen až 125% jmenovitého napětí (tedy 500 V).

1.2 Parametry z přímého měření

Při přímém měření byl měřen elektrický výkon, který byl přiváděn do stroje (příkon) a zároveň mechanický výkon dodávaný strojem. Parametry z tohoto měření byly odečteny při teplotní stabilizaci stroje a to po dvou hodinách chodu stroje při jmenovitém zatížení 7,37 N. m. Jmenovité zatížení bylo vypočítáno ze štítkových hodnot stroje, viz obrázek 1.3 jako:

$$M_z = \frac{P_2 \cdot 60}{2 \cdot n \cdot \pi} = \frac{2200 \cdot 60}{2 \cdot 2850 \cdot \pi} = \underline{7,37 \text{ N.m}} \quad (1.1)$$



Obrázek 1.3 – Štítkové hodnoty měřeného stroje

Dále bylo po dvou hodinách provozu stroje při jmenovitém zatížení odečteno z analyzátoru výkonu pět hodnot příkonu a otáček (s odstupem času 120 sekund), z nichž byl poté vypočítán průměr pro dosažení přesnější zkušební hodnoty. Odečtené parametry z prvního i druhého měření jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 – Parametry z přímého měření

	Měření [i]	P ₁ [W]	Σ(P ₁)/i [W]	n [min ⁻¹]	Σ(n)/i [min ⁻¹]	M _Z [N. m]	Σ(M _Z)/i [N. m]
Data z prvního měření	1.	2650	2651	2880	2881,4	7,373	7,37
	2.	2650		2883		7,37	
	3.	2652		2881		7,371	
	4.	2651		2883		7,376	
	5.	2652		2880		7,36	
Data z druhého měření	1.	2633	2632,6	2887	2890,6	7,373	7,37
	2.	2633		2887		7,37	
	3.	2632		2897		7,371	
	4.	2632		2890		7,376	
	5.	2633		2892		7,36	

Příklad výpočtu účinnosti z přímého měření, za použití hodnot z druhého měření:

Výkon na hřídeli (P₂), je:

$$P_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_Z \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7,37 \cdot 2890,6}{60} = 2230,9 \text{ W} \quad (1.2)$$

Účinnost z přímého měření (η_p) je potom:

$$\eta_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2230,9}{2632,6} \cong \underline{\underline{0,847}} \quad (1.3)$$

1.3 Parametry z nepřímého měření

Účinnost z nepřímého měření se podle EN 60034-2-1 stanoví, jako:

$$\eta_n = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \quad (1.4)$$

, kde:

P_T – jsou celkové ztráty ve stroji a jsou brány, jako součet ztrát konstantních (P_K), ztrát při zatížení (P_S) a přídatných ztrát při zatížení (P_{LL}).

Jednotlivé složky celkových ztrát byly postupně měřeny za určitého stavu stroje.

1.3.1 Určení velikosti konstantních ztrát

Konstantní ztráty jsou součtem ztrát třením, ventilačních a ztrát v železe (P_{Fe}). Ventilační ztráty a ztráty třením jsou nezávislé na zatížení stroje a zachovávají konstantní velikost. Při měření je vyčíslujeme jedinou hodnotou, zahrnující obě složky těchto ztrát (P_{fw}). Matematicky lze velikost konstantních ztrát zapsat, jako:

$$P_K = P_{fw} + P_{Fe} \quad (1.5)$$

Vlastní měření konstantních ztrát probíhalo za podmínek zkoušky stroje naprázdno, přičemž ztráty byly stabilizovány dodržением těchto podmínek:

- stroj napájen napětím o jmenovitém kmitočtu
- zkouška naprázdno probíhala bezprostředně po zkoušce při zatížení (teplotně stabilní stroj). Norma také připouští, že ztráty naprázdno jsou považovány za stabilizované, pokud se mění velikost příkonu naprázdno ve dvou po sobě jdoucích 30 minutových intervalech měření o 3% nebo méně.

Jak již bylo uvedeno výše, nemohl být splněn požadavek napájení stroje jmenovitým napětím při prvním měření, přičemž maximální napájecí napětí mělo hodnotu 380 V.

Stroj byl měřen u prvního měření při 11. hodnotách napájecího napětí a u druhého potom při 14. hodnotách napájecího napětí. Byly odečteny a dopočítány údaje uvedené v příloze P1, kdy při prvním měření byl naměřen odpor vinutí na konci měření $R_0 = 5,73 \Omega$.

U druhého měření byl odpor R_0 měřen v závislosti na čase od vypnutí zdroje a přiložení měřících hrotů mikroohmmetru. Ze známých hodnot odporů v jednotlivých časech jsem sestrojil křivku a extrapoloval ji na nulovou hodnotu času, čímž jsem získal hodnotu odporu v okamžiku vypnutí zdroje. Hodnoty odporů, časů a extrapolace z měření naprázdno jsou uvedeny v příloze P2.

Z dat uvedených v příloze P1 jsem vytvořil křivky konstantních ztrát (P_K) v závislosti na druhé mocnině napájecího napětí (U_0^2) a následně jsem vzniklé přímky extrapoloval na nulové napětí (využil jsem rovnici regrese v programu MS-Excell), přičemž průsečík s osou nulového napětí nám udává velikost ztrát třením a ventilací (P_{fw}). Grafy této závislosti jsou vyobrazeny v příloze P3. Z rovnice regrese (po dosazení za $x=0$, viz příloha P3), jsem dostal konečnou hodnotu velikosti ztrát třením a ventilací (z dat druhého měření):

$$P_{fw} = \underline{34,26W} \quad (1.6)$$

Dále jsem z hodnot napětí naprázdno (mezi hodnotami 60% až 125% jmenovitého napětí, přičemž nebyla dodržena podmínka u prvního měření, kdy má být dosaženo až 125% napájecího napětí) sestrojil grafy závislosti ztrát v železe (P_{Fe}) na napětí U_0 , viz příloha P4. Ztráty v železe byly určeny pro různé velikosti napětí naprázdno jako:

$$P_{Fe} = P_K - P_{fw} \quad (1.7)$$

Jednotlivé parametry grafu v příloze P4 jsou brány z tabulky 2.

Tabulka 2 – Parametry pro určení ztrát v železe

	Nastavené napětí U_0 [V]	Konstantní ztráty P_K [W]	Ztráty třením a ztráty ventilační P_{fw} [W]	Ztráty v železe P_{Fe} [W]
Parametry z prvního měření	380,370	117,028	37,075	79,953
	359,460	106,748	37,075	69,673
	340,790	96,451	37,075	59,376
	300,140	79,578	37,075	42,503
	260,740	69,819	37,075	32,744
Parametry z druhého měření	500,640	300,726	34,260	266,466
	450,540	198,941	34,260	164,681
	400,600	136,135	34,260	101,875
	360,540	104,743	34,260	70,483
	320,650	86,224	34,260	51,964

Pro pozdější analýzu ztrát v železe v různých zatěžovacích bodech (zkouška při zatížení) jsem proložil vzniklé závislosti (grafy v příloze P4) regresními křivkami a nechal zobrazit rovnice regrese.

1.3.2 Určení velikosti ztrát při zatížení

Pro určení těchto ztrát jsem provedl zkoušku při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení. Stroj byl při této zkoušce zatěžován jmenovitým momentem po dobu dvou hodin, jelikož při prvním měření nebyly prostředky k měření teploty vinutí, odhadl jsem tuto dobu, za kterou se stroj nacházel v tepelné rovnováze (gradient teploty 2K/hodinu). Odhad této doby byl potvrzen orientačním měření teploty při druhém měření. Na konci zatěžovací zkoušky jsem zaznamenal tyto parametry:

- P_N , U_N , I_N , f , s , R_s

Jmenovitý příkon (P_N), napětí (U_N), proud (I_N) a frekvence (f) byly odečteny z dat v programu M-Test 7. Skluz (s) byl vypočítán ze známé hodnoty otáček rotoru a frekvence (f). Zkušební odpor (R_s), pro jmenovité zatížení byl změřen mikroohmmetrem Cropico DO 5001 v několika časových úsecích pro zjištění závislosti odporu statorového vinutí na čase po vypnutí napájení a připojení ohmmetru. Ze známých hodnot v tabulce 3 byla sestrojena závislost velikosti odporu statorového vinutí na čase od vypnutí napájení. Protože jsem odpor vinutí začal měřit až v čase 30 sekund od vypnutí, extrapoloval jsem hodnotu pro čas vypnutí (0 sekund) ze známých hodnot a regresní křivky tak, jak je uvedeno na grafu v příloze P5. Velikost odporů vinutí při prvním a druhém měření se značně liší. To bylo způsobeno chybným nastavením mikroohmmetru při prvním měření.

Tabulka 3 – Naměřené hodnoty odporu statorového vinutí po zkoušce jmenovitým zatížením

Parametry prvního měření		Parametry druhého měření	
t [s]	R_s [Ω]	t [s]	R_s [Ω]
30	7,019	30	5,519
90	6,86	80	5,385
120	6,823	140	5,31
180	6,756	180	5,278
240	6,706	240	5,244
300	6,669	300	5,216
420	6,619	420	5,176
600	6,577	600	5,133
900	6,51	900	5,081
1200	6,456	1200	5,044

V dalším potom uvažují hodnotu odporu statorového vinutí vypočtenou z regresní rovnice parametrů druhého měření, viz příloha P5, v čase $t = 0$ sekund, tj. hodnotu:

$$R_s = 5,944 \, \Omega \quad (1.8)$$

Dalším krokem analýzy naměřených dat je určení odporu statorového vinutí v závislosti na zatížení motoru, tj. provedení zkoušky křivky zatížení. Tato zkouška probíhala bezprostředně po zkoušce při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení, kdy se stroj postupně zatěžoval šesti různými momenty. Norma EN 60034-2-1 stanoví, že čtyři zatěžovací body mají být zvoleny tak, aby byly přibližně rovnoměrně rozděleny od 25 % do 100 % zatížení. Zbývající dva zatěžovací body mají být vhodně zvoleny a rovnoměrně rozděleny nad 100 %, maximálně však do 150 % velikosti jmenovitého momentu stroje. Při zatěžování se začíná v nejvyšším bodě zatížení a pokračuje se postupně k nejnižšímu bodu zatížení, přičemž se tato zkouška má provádět co nejrychleji z důvodu co nejmenší změny teploty ve stroji. Odpor statorového vinutí se změřil nejprve před zahájením zatěžování 150 % momentu (tj. odpor odpovídá hodnotě stanovené při jmenovitém chodu stroje $\Rightarrow R_s = 5,944 \, \Omega$) a po odečtení nejnižšího zatížení. Dále se sestrojí závislost odporu dle normy, tj. odpor pro 100% a vyšší zatížení je hodnota odporu, jako při jmenovitém chodu stroje. Odpor pro 100% zatížení a nižší (do 25 % zatížení) je určen z lineární závislosti těchto dvou bodů tak, jak je provedeno v příloze P6. Po 25 % zatížení byl odečten odpor statorového vinutí o velikosti $R_{s25\%} = 5,915 \, \Omega$ stejným postupem, jako při měření jmenovitým zatížením, tj. extrapolací na nulu v případě druhého měření, viz příloha P7. U prvního měření byl tento odpor změřen pouze v době 30 sekund od vypnutí a měl hodnotu 6,858 Ω . Z těchto známých hodnot, které jsou pro přehlednost zaneseny v tabulce 4, byl sestrojen graf závislosti velikosti odporu statorového vinutí na velikosti zatížení motoru, viz příloha P6.

Tabulka 4 – Parametry ze zkoušek křivek zatížení

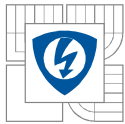
Parametry prvního měření				Parametry druhého měření					
U_N [V]	I_N [A]	M_Z [N.m]	R_s [Ω]	U_N [V]	I_N [A]	M_Z [N.m]	R_s [Ω]	f [Hz]	n [min ⁻¹]
384,08	6,696	11,055	7,544	400,22	6,414	11,040	5,944	50	2831
385,17	5,594	9,210	7,544	400,26	5,42	9,209	5,944	49,96	2862
385,73	4,579	7,370	7,544	400,31	4,49	7,367	5,944	49,97	2893
385,71	3,657	5,530	7,315	400,34	3,646	5,531	5,934	49,92	2923
385,98	2,829	3,690	7,087	400,38	2,919	3,689	5,925	50,01	2944
386,49	2,187	1,840	6,858	400,41	2,362	1,840	5,915	49,99	2971

Příklad výpočtu pro zvýrazněné buňky tabulky 4:

S využitím rovnice regrese křivky z grafu v příloze P6 (druhé měření), kde za (x) dosadím hodnotu zatěžovacího momentu ($M_Z = 3,689$ N.m) dostanu:

$$R_s = 0,00524697 \cdot 3,689 + 5,90534558 = 5,925 \, \Omega \quad (1.9)$$

Ostatní hodnoty v tabulce 4 byly odečteny ze softwaru M-Test 7.



Na základě výše uvedených naměřených nebo vypočtených hodnot lze vyčíslit ztráty ve statorovém vinutí a ztráty v rotorovém vinutí (v kleci rotoru). Ztráty ve statorovém vinutí pro jmenovitý chod stroje jsou dány vztahem (dosazována hodnota proudu pro jmenovité zatížení při druhém měření $M_Z=7,367$ z tabulky 4):

$$P_S = 1,5 \cdot I_N^2 \cdot R_S = 1,5 \cdot 4,49^2 \cdot 5,944 = \underline{179,747 \text{ W}} \quad (1.10)$$

Ztráty v kleci rotoru (jmenovitý chod) lze vypočítat, jako:

$$P_R = (P_1 - P_S - P_{Fe}) \cdot s \quad (1.11)$$

Pro jmenovitý chod je nutné určit velikost ztrát v železe. Tuto informaci získám za použití grafu v příloze P4, kdy za hodnotu napětí U_0 dosadím hodnotu napětí U_R , která bere v úvahu odporový úbytek napětí ve statorovém vinutí:

$$U_R = \sqrt{\left(U_N - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_N \cdot R_S \cdot \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_N \cdot R_S \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N} \right)^2} \right)^2} \quad (1.12)$$

Po dosazení hodnot z tabulky 4 pro zvolený zatěžovací bod (v tomto případě pro jmenovitý stav, tj. pro $M_Z=7,367$) bude:

$$U_R = \underline{380,96 \text{ V}} \quad (1.13)$$

Pro tuto hodnotu využiji rovnici regrese z grafu v příloze P4, kde za ($x=U_0$) dosadím hodnotu U_R .

Ztráty v železe při jmenovité zátěži budou po dosazení mít velikost:

$$P_{Fe} = \underline{82,339 \text{ W}} \quad (1.14)$$

Po dosazení této hodnoty do vztahu (1.11) dostanu ztráty v kleci rotoru (P_R), (hodnota příkonu P_1 dosazována z tabulky 1, ostatní hodnoty z tabulky 4):

$$P_R = (2632,6 - 179,747 - 82,339) \cdot \frac{49,97.60 - 2893}{49,97.60} = \underline{83,18 \text{ W}} \quad (1.15)$$

1.3.3 Určení přídatných ztrát při zatížení

Zbytkové ztráty ve stroji byly určeny pro každý zatěžovací bod tak, že se od příkonu (P_1) odečetl výkon (P_2), ztráty ve satorovém vinutí při odporu závislém na zatížení (P_S), ztráty v železe (P_{Fe}), ztráty ventilační, ztráty třením (P_{fw}) a ztráty v rotorové kleci při hodnotě skluzu dané zatížením (P_R). Pro přehlednost jsou všechny hodnoty pro určení zbytkových ztrát uvedeny v tabulce 5, kde jsou uvedeny hodnoty naměřené při prvním měření a v tabulce 6, kde jsou dále hodnoty z druhého měření.

Tabulka 5 – Parametry pro výpočet zbytkových ztrát při prvním měření

P_1 [W]	M_Z [N. m]	n [rad/s]	P_2 [W]	P_S [W]	P_R [W]	P_{Fe} [W]	P_{fw} [W]	P_{Lr} [W]
4044	11,05	294,7	3256,2	252,474	227,85	78,292	37,369	191,785
3333	9,21	298,1	2745,8	176,21	153,815	82,407	37,369	137,356
2651	7,37	301,6	2222,7	118,067	96,9788	86,14	37,369	89,745
1997	5,535	305,2	1689,0	73,1405	46,1065	89,7	37,369	61,6601
1365	3,69	308,5	1138,4	42,4732	21,7638	93,3	37,369	31,7127
751	1,84	310,8	571,9	24,6012	6,32817	96,912	37,369	13,9025

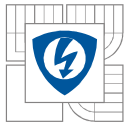
Příklad výpočtu zbytkových ztrát (P_{Lr}) pro označený řádek tabulky 5:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_S - P_R - P_{Fe} - P_{fw} \quad (1.16)$$

$$P_{Lr} = 2651 - 2222,7 - 118,067 - 96,9788 - 86,14 - 37,369 = \underline{89,745 \text{ W}} \quad (1.17)$$

Tabulka 6 – Parametry pro výpočet zbytkových ztrát při druhém měření

P_1 [W]	M_Z [N. m]	n [rad/s]	P_2 [W]	P_S [W]	P_R [W]	P_{Fe} [W]	P_{fw} [W]	P_{Lr} [W]
3991	11,04	296,46	3272,94	366,80	199,96	74,57	34,26	42,47
3300	9,209	299,71	2760,01	261,92	133,89	78,37	34,26	31,55
2633	7,367	302,95	2231,86	179,75	83,19	82,34	34,26	21,60
1988	5,531	306,10	1693,02	118,33	42,98	86,46	34,26	12,94
1363	3,689	308,29	1137,30	75,72	22,57	90,72	34,26	2,42
753	1,84	311,12	572,47	49,50	5,76	95,11	34,26	-4,10



Data získaná k vyčíslení zbytkových ztrát musí být vyvážena dle EN 60034-2-1 lineární regresní analýzou, která je založena na vyjádření ztrát v závislosti na druhé mocnině zatěžovacího momentu.

Po provedeném vyvážení jsem vypočetl velikost korelačních koeficientů (γ_1 a γ_2), zvláště pro první a druhé měření. U prvního měření jsem se dopustil (zvláště při měření velikosti statorového vinutí) vlivem špatného nastavení mikroohmmetru značných chyb, v důsledku čehož vyšla záporná korelace o hodnotě:

$$\gamma_1 = -0,977 \quad (1.18)$$

a korelace pro druhé měření vyšla:

$$\gamma_2 = 0,988 \quad (1.19)$$

Z výše uvedené regresní analýzy byly sestrojeny závislosti:

$$P_{LL} = A \cdot M_Z^2 \quad (1.20)$$

kde:

- P_{LL} jsou přídavné ztráty při zatížení [W].
- koeficient A udává sklon přímky a byl určen z výše popsaného postupu, který je podrobněji popsán v normě EN60034-2-1. Tento sklon byl pomocí programu MS-Excell vypočítán a má velikost -0,333 pro první měření a 0,384 pro druhé měření.

Výsledné závislosti regresní analýzy jsou udány grafem v příloze P8, který umožňuje pomocí vztahu (1.20) určit velikost přídavných ztrát při zvoleném zatížení stroje. Pro posouzení o vhodnosti prvního, nebo druhého měření jsem vypočetl přídavné ztráty pro obě měření, avšak dále počítám pouze s hodnotami z druhého měření, které vykazuje mnohem lepší přesnost.

Přídavné ztráty pro jmenovité zatížení stroje budou mít velikost:

$$P_{LL} = A \cdot M_Z^2 = 0,384 \cdot 7,37^2 = \underline{20,86 \text{ W}} \quad (1.21)$$

Nyní je možné dle vztahu (1.4) vyčíslit celkovou účinnost z nepřímého měření (dosazovány hodnoty výše vypočtených jednotlivých ztrát z Tabulky 6 pro jmenovitý provoz stroje a velikost přídavných ztrát ze vztahu 1.21), jako:

$$\eta_n = \frac{P_1 - P_S - P_R - P_{Fe} - P_{fW} - P_{LL}}{P_1} \quad (1.22)$$

$$\eta_n = \frac{2633 - 179,75 - 83,19 - 82,34 - 34,26 - \underline{20,86}}{2633} = \underline{\underline{0,848}} \quad (1.23)$$

2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ÚČINNOSTI ZADANÉHO MOTORU

Z údajů na štítku měřeného motoru TM90-2L-100 (viz obrázek 1.3), společně s využitím technické dokumentace byly vypočteny jednotlivé složky ztrát. Zároveň bylo možné ze známých odporů vinutí před začátkem měření a po provedené oteplovací zkoušce stanovit přesněji teplotu ve vinutí a tím zpřesnit údaje o velikosti jednotlivých ztrát (na místo použití tabulkových hodnot z některé literatury zabývající se návrhem točivých strojů). Velikosti jednotlivých složek ztrát byly vyčísleny s využitím vztahů uvedených v literatuře [1,2 a 4].

Dále jsem za pomoci programu RMXprt vytvořil model třífázového asynchronního stroje, ve kterém jsem definoval jednotlivé rozměry a také materiály podle technické dokumentace ke stroji. Výstup dat z programu jsem na konci analýzy srovnal s parametry naměřenými na reálném stroji a s parametry vypočtenými analyticky. Jednotlivé kroky jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1 Ztráty ve statorovém vinutí

Ztráty v mědi statorového vinutí jsou dány vztahem:

$$P_S = 3 \cdot R_S \cdot I_n^2 \quad (2.1)$$

Celkový odpor statorového vinutí určím, jako:

$$R_S = \rho_x \cdot c \cdot \frac{l_v}{S_0} \quad (2.2)$$

, kde:

- $\rho_x \cdot c$ je rezistivita mědi při jmenovité teplotě motoru (určená ze známých hodnot odporů z oteplovací zkoušky).
- l_v je celková délka statorového vinutí, přičemž je použito soustředné vinutí s dvěma menšími a s dvěma většími cívkami. Zároveň je připočtena délka všech vývodů cívek, jejíž velikost byla odečtena z technické dokumentace od výrobce. Jedna cívka je tvořena 46 závitů.
- S_0 je výpočetní průřez vodičů statorového vinutí, přičemž pro stávající vinutí bylo použito vodičů o průměrech 0,63 mm a 0,71 mm.

Rezistivita mědi při jmenovité teplotě motoru byla stanovena ze známých hodnot odporů před zahájením měření a po provedené oteplovací zkoušce. Odpor vinutí byl naměřen zvláště mezi každými sousedními fázemi a výsledné hodnoty se zprůměrovaly. Hodnota odporu před zahájením zkoušek odpovídá hodnotě v označené buňce tabulky 7.

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty statorových vinutí

Odpor statorového vinutí			
R_{U-V} [Ω]	R_{U-W} [Ω]	R_{V-W} [Ω]	$\Sigma R/3$ [Ω]
4,486	4,509	4,493	4,496
Poznámka: Hodnoty odporů měřeny při 22 °C.			

Z těchto hodnot lze určit teplotu (T) ve vinutí statoru ze vztahu:

$$R_S = R_{22^\circ\text{C}} \cdot \left(1 + \frac{T - 22}{234,5 + 22} \right) \quad (2.3)$$

Po úpravě a dosazení dostaneme:

$$T = \frac{254,5 \cdot (R_S - R_{22^\circ\text{C}}) + 22 \cdot R_{22^\circ\text{C}}}{R_{22^\circ\text{C}}} = \frac{254,5 \cdot (5,944 - 4,496) + 22 \cdot 4,496}{4,496} \cong 104^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

Při použití známé velikosti teploty ve vinutí a za použití tabulkové hodnoty rezistivity mědi ($\rho_{20} = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) lze vypočítat rezistivitu při dané teplotě:

$$\rho_{104} = \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{234,5 + 20} \right) = 1,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{(104 - 20)}{254,5} \right) = 2,368 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad (2.5)$$

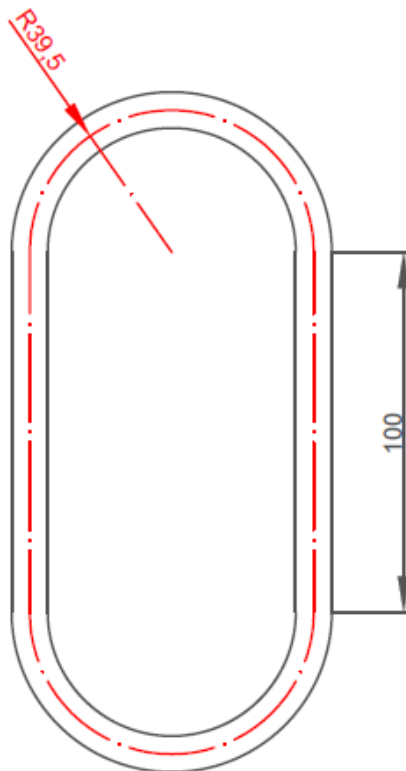
Za použití rozměrů jednotlivých cívek použitého soustředného vinutí od výrobce, vyčísím délku vodiče pro konstrukci cívky jedné fáze, jako:

Střední délka cívky (l_v) je:

$$l_v = 4 \cdot N_{1c} \cdot (2 \cdot l_{Fe} + 2 \cdot \pi \cdot r_{stř.c}) \quad (2.6)$$

, kde:

- N_{1c} je počet závitů jedné ze čtyř cívek na fázi (v tomto případě 46 závitů).
- l_{Fe} je délka železa (z technické dokumentace rovna 0,1 m).
- $r_{stř.c}$ je střední poloměr cívek soustředného vinutí dle obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 – Rozměry satorového vinutí

Po vyčíslení (2.6):

$$l_v = 4.46 \cdot (2.0,1 + 2 \cdot \pi \cdot 0,0395) = 82,47 \text{ m} \quad (2.7)$$

Ve stávajícím vinutí měřeného asynchronního motoru je použito dvou paralelních vodičů o dvou různých průměrech.

Průměr menšího vodiče je $d_m = 0,63 \text{ mm}$ a průměr většího vodiče je $d_v = 0,71 \text{ mm}$.

Průřez menšího vodiče S_m :

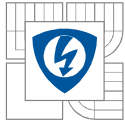
$$S_m = \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,63^2}{4} = 0,312 \text{ mm}^2 \quad (2.8)$$

Průřez většího vodiče S_v :

$$S_v = \pi \cdot \frac{d_v^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,71^2}{4} = 0,396 \text{ mm}^2 \quad (2.9)$$

Celkový výpočetní průřez:

$$S_0 = S_m + S_v = 0,708 \text{ mm}^2 \quad (2.10)$$



Ztráty ve satorovém vinutí při jmenovitém chodu stroje potom budou {po dosazení do (2.1)}:

$$P_S = 3 \cdot \rho_{104} \cdot \frac{l_v}{S_0} \cdot I_n^2 = 3,2,368 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{82,47}{0,708 \cdot 10^{-6}} \cdot 4,6^2 = \underline{175,1 \text{ W}} \quad (2.11)$$

2.2 Ztráty v železe statoru

Ztráty v železe statoru lze rozdělit na ztráty ve jhu a ztráty v zubech statoru, přičemž velikost ztrát ve jhu statoru se stanoví, jako:

$$P_{jho} = k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot \pi \cdot \frac{(D_{os}^2 - d_{os1}^2)}{4} \cdot \gamma_{Fe} \cdot K_t \cdot p_{1,0} \cdot B_{js}^2 \quad (2.12)$$

, a ztráty v zubech statoru jako:

$$P_{zuby} = k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot \left[\pi \cdot \frac{(d_{os1}^2 - d_{os2}^2)}{4} - Q_1 \cdot S_{drážky} \right] \cdot \gamma_{Fe} \cdot K_t \cdot p_{1,0} \cdot B_{zuby}^2 \quad (2.13)$$

, kde:

- k_{Fe} je činitel plnění železa 0,96.
- l_{Fe} je délka železa (0,1 m).
- $D_{os} = 135 \text{ mm}$, $d_{os1} = 97,6 \text{ mm}$, $d_{os2} = 72 \text{ mm}$ jsou rozměry satorových plechů. (dosazovány hodnoty od výrobce).
- γ_{Fe} je hustota železa (tabulková hodnota 7800 kg/m^3).
- K_t jsou koeficienty opracování plechů při výrobě voleny v rozmezí 1,6 – 1,8. Volím 1,7 pro ztráty ve jhu statoru a 1,8 pro ztráty v zubech statoru.
- $p_{1,0}$ jsou měrné ztráty plechů (při $B=1 \text{ T}$ a $f=50 \text{ Hz}$ jsou rovny $3,05 \text{ W/kg}$ dle parametrů od výrobce plechů viz příloha P9).
- B_{js} , B_{zuby} je hodnota indukce ve jhu a v zubech statoru, (hodnoty vypočteny v předešlé semestrální práci, $B_{js}=1,52 \text{ T}$, $B_{zuby}=1,7 \text{ T}$).
- Q_1 je počet satorových drážek.
- $S_{drážky}$ je plocha drážky, stanovená z technické dokumentace ($79,05 \text{ mm}^2$).

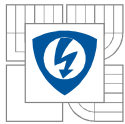
Po dosazení a vypočtení vychází:

$$P_{jho} = \underline{62,52 \text{ W}} \quad (2.14)$$

$$P_{zuby} = \underline{17,97 \text{ W}} \quad (2.15)$$

Celkové ztráty v železe statoru potom budou:

$$P_{Fe} = P_{jho} + P_{zuby} = \underline{80,5 \text{ W}} \quad (2.16)$$



2.3 Ztráty v kleci rotoru

Elektrické ztráty v klecovém vinutí rotoru lze vypočítat, jako:

$$P_R = Q_2 \cdot R_{2r} \cdot I_2^2 \quad (2.17)$$

,kde proud I_2 je určen, jako:

$$I_2 = (0,8 \cdot \cos \varphi + 0,2) \cdot \frac{2 \cdot m \cdot N_{fs1} \cdot k_v \cdot I_{1N}}{Q_2} \quad (2.18)$$

$$I_2 = (0,8 \cdot 0,86 + 0,2) \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 46 \cdot 0,9577 \cdot 4,6}{19} = 227,31 \text{ A} \quad (2.19)$$

Odpor jedné tyče klece rotoru bude mít velikost:

$$R_t = \rho_t \cdot \frac{l_t}{S_t} \quad (2.20)$$

, kde:

- ρ_t je rezistivita materiálu tyče při provozní teplotě. Tabulková hodnota měrného odporu elektrotechnického hliníku je $2,99 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ při teplotě 20°C .

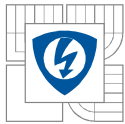
Protože neznám přesnou velikost teploty na rotorové části stroje, uvažuji stejnou teplotu, jako při výpočtu ztrát ve vinutí statoru, tj. 104°C a pro tuto teplotu vypočtu konečnou velikost ρ_t jako:

$$\rho_t = \rho_{t20^\circ \text{C}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{244,5 + 20}\right) = 2,99 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{104 - 20}{264,5}\right) = \underline{3,94 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}} \quad (2.21)$$

- l_t je délka tyče rovná vzdálenosti mezi kruhy nakrátko (v našem případě je rovna $0,1 \text{ m}$).
- S_t je průřez tyče (z dokumentace výrobce byla odečtena hodnota $S_t = 53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$).

Po dosazení do (2.20):

$$R_t = 3,94 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,1}{53 \cdot 10^{-6}} = 7,43 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.22)$$



Odpor částí kruhu nakrátko mezi sousedními tyčemi:

$$R_{kn} = \rho_{kn} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} \quad (2.23)$$

, kde:

- ρ_{kn} je rezistivita materiálu kruhu nakrátko při provozní teplotě určená stejně, jako v předešlém odstavci a má velikost $\rho_{kn} = 3,94 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.
- D_{kn} je střední průměr kruhu nakrátko (viz dokumentace výrobce $D_{kn} = 57,4 \text{ mm}$).
- S_{kn} je příčný průřez kruhu nakrátko (viz dokumentace výrobce $S_{kn} = 266 \text{ mm}^2$).

Po dosazení do vztahu (2.23):

$$R_{kn} = 3,94 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,0574}{19.266 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.24)$$

Činný odpor rotorového vinutí (R_{2r}) (jedné tyče s částí kruhu):

$$R_{2r} = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\left(2 \cdot \sin \frac{\pi}{Q_2}\right)^2} = 7,43 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot \frac{1,4 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \cdot \sin \frac{\pi}{19}\right)^2} = 1,001 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.25)$$

Dosazením do (2.17) získáme velikost ztrát v kleci rotoru:

$$P_R = Q_2 \cdot R_{2r} \cdot I_2^2 = 19.1001 \cdot 10^{-4} \cdot 227,31^2 \cong \underline{98,3 \text{ W}} \quad (2.26)$$

2.4 Mechanické ztráty

Tyto ztráty v sobě zahrnují ztráty třením ložisek a ztráty ventilační, které jsou dány odporem vzduchu při otáčení rotoru. Tyto ztráty jsou konstantní a nezávislé na zatížení motoru. Velikost těchto ztrát určíme použitím empirického vzorce (literatura [2]):

$$P_{fw} = \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_v^4 = \left(\frac{3000}{10}\right)^2 \cdot 0,135^4 = \underline{29,9 \text{ W}} \quad (2.27)$$

, kde:

- D_v je vnější průměr ventilátoru (dle literatury [2] lze uvažovat vnější průměr rotoru).

2.5 Přídavné ztráty při zatížení

Pro jmenovité zatížení motoru lze vyčíslit přídavné ztráty motoru, jako 0,5% jmenovitého výkonu. Dle literatury [2], však mohou tyto ztráty u motorů s natočenými drážkami rotoru nabývat hodnoty až 2% jmenovitého výkonu. Rozmezí těchto ztrát tedy bude:

$$P_{LL} = (0,005 \div 0,02) \cdot P_2 = (0,005 \div 0,02) \cdot 2200 = \underline{11 \text{ až } 44 \text{ W}} \quad (2.28)$$

2.6 Stanovení účinnosti

Účinnost je stanovena, jako poměr elektrického příkonu, od kterého jsou odečteny celkové ztráty (součet ztrát ve vinutí statoru (P_S), v železe (P_{Fe}), v kleci rotoru (P_R), mechanické (P_{fw}) a přídavných (P_{LL})) k elektrickému příkonu. Elektrický příkon stroje je z měření při jmenovitém chodu stroje:

$$P_1 = 2633 \text{ W} \quad (2.29)$$

Účinnost potom bude:

$$\eta_2 = \frac{P_1 - P_S - P_{Fe} - P_R - P_{fw} - P_{LL}}{P_1} \quad (2.30)$$

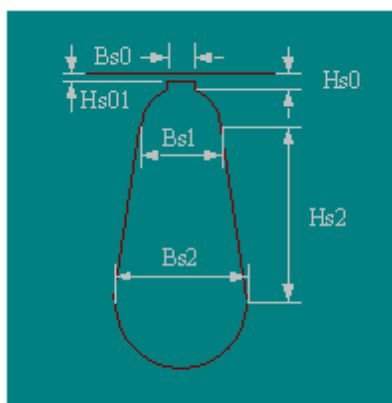
$$\eta_2 = \frac{2633 - 175,1 - 80,5 - 98,3 - 29,9 - 11}{2633} = \underline{\underline{0,85}} \quad (2.31)$$

2.7 Výpočet asynchronního motoru v programu RMxprt

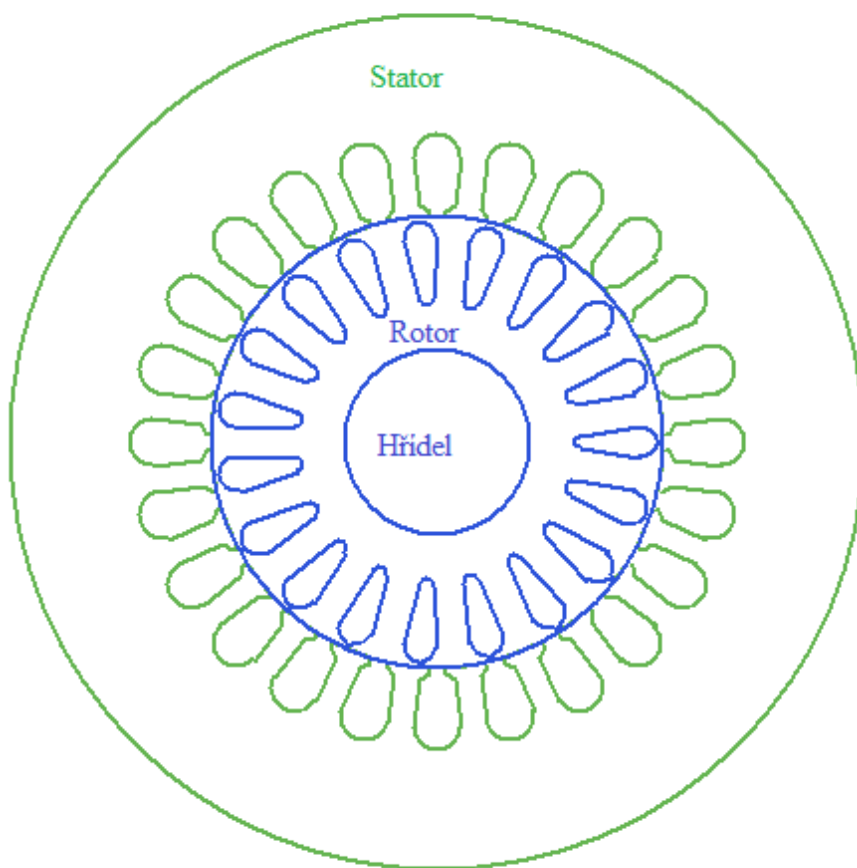
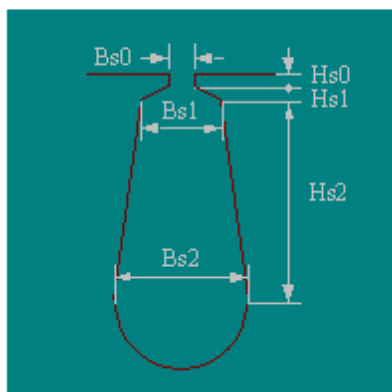
Program RMxprt je speciální program pro urychlení návrhů a optimalizací různých typů točivých strojů (odtud název RM – Rotation machine). Program umožňuje porovnávat počáteční stav stroje s navrhovanou změnou pro zvýšení například celkové účinnosti stroje tzv. „what-if“ analýzu, čehož jsem využil v této kapitole. Po jednoduchém vytvoření modelu skutečného stroje a definování jednotlivých materiálů stroje lze po základní analýze získat i 2D a 3D model, na kterých je možné dále zobrazit například rozložení toku magnetické indukce v jednotlivých částech stroje a v případě 3D modelu zpřesnit výpočty i při uvažování natočených tyčí v kleci rotoru asynchronního stroje. Parametry z programu RMxprt jsem na konci analýzy srovnal s parametry naměřenými na reálném stroji a s parametry vypočtenými analyticky.

Při realizaci modelu v programu RMxpert jsem zvolil typ modelovaného stroje (v tomto případě Three-Phase Induction Motor), zadal postupně rozměry statoru i rotoru (vnitřní a vnější průměr, délku železa, typ drážek včetně jejich rozměrů) a nadeřinoval vlastnosti materiálů jednotlivých částí stroje. Toto je znázorněno na obrázku 2.2.

Rozměry rotorové drážky

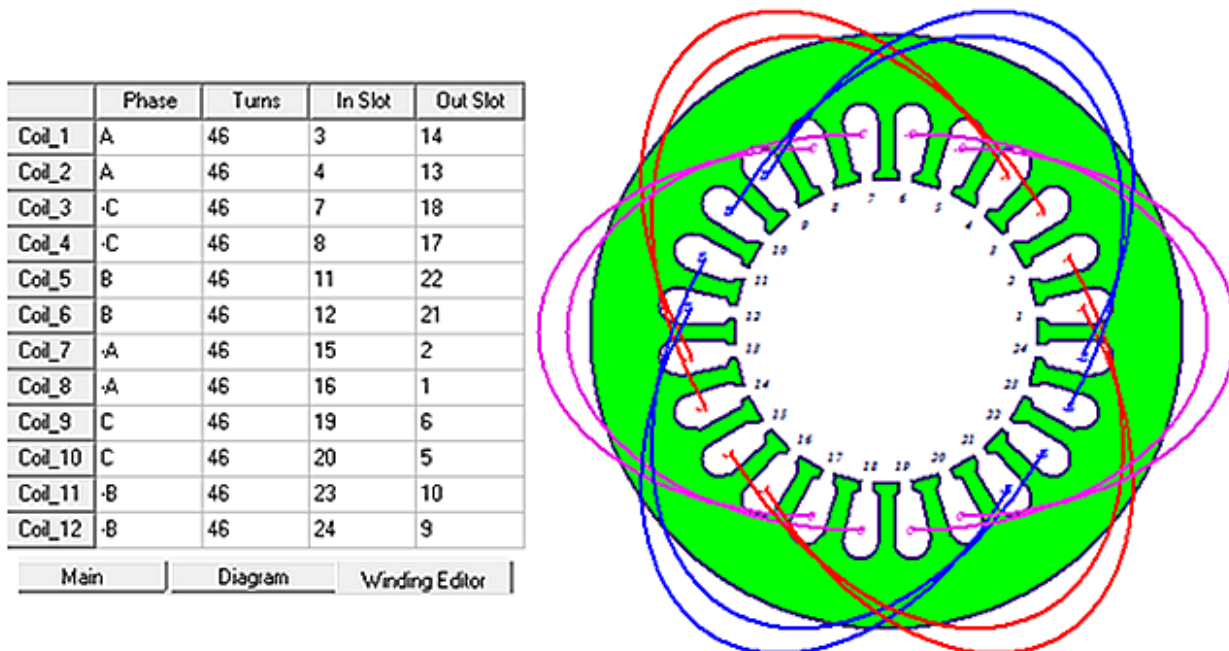


Rozměry statorové drážky



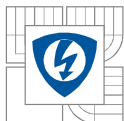
Obrázek 2.2– Nadeřinování rozměrů statoru a rotoru

Dále jsem definoval vinutí statoru v editoru vinutí, protože na stávajícím statoru asynchronního motoru nebylo použito žádné z předdefinovaných vinutí, které nabízí k výběru program RMxpert tak, jak ukazuje obrázek 2.3, přičemž podrobnosti o zapojení vinutí jsem vyčetl z technické dokumentace výrobce motoru.



Obrázek 2.3 – Postup vytvoření vinutí statoru v modelu stroje

Pro výstupní analýzu jsem dále nadefinoval napájení stroje (při zapojení vinutí do hvězdy bude mít hodnotu 400 V), konstantní výstupní výkon (2200W), počet pólů stroje (2), provozní teplotu stroje, přičemž zadávám vypočtenou hodnotu teploty statorového vinutí z měření, tj. 104 °C a výstupní otáčky stroje (2850 min⁻¹). Po nadefinování stávajícího stroje lze spustit analýzu, přičemž výstupem jsou hodnoty jak v tabulkové, tak grafické podobě. Pro další srovnání s měřením a analytickým výpočtem jsem jednotlivé velikosti ztrát a výslednou účinnost stroje po provedené analýze v programu RMXprt pro přehlednost uvedl v tabulce 8.



Tabulka 8 – Parametry elektrického stroje

Data z analýzy programu RMxprt												
Odpor vinutí při jmen. stavu stroje	Odpor vinutí při 20 °C	Fázový proud	Napájecí napětí	Účinník	Příkon	Výkon	Ztráty ve vinutí	Ztráty v železe	Ztráty v kleci rotoru	Ztráty konstantní	Ztráty přidavné	Účinnost
$R_{1f104^{\circ}\text{C}} [\Omega]$	$R_{1f20^{\circ}\text{C}} [\Omega]$	$I_{1N} [\text{A}]$	$U_{1N} [\text{V}]$	$\cos\varphi$	$P_1 [\text{W}]$	$P_2 [\text{W}]$	$P_{\text{Cu}} [\text{W}]$	$P_{\text{Fe}} [\text{W}]$	$P_r [\text{W}]$	$P_{\text{fW}} [\text{W}]$	$P_{\text{LL}} [\text{W}]$	$\eta [-]$
2,99775	2,25495	4,276	400	0,878	2620,2	2228,7	164,4	83,52	88,35	34,26	20,86	0,8586
Data z měření na reálném elektrickém stroji TM90-2L												
2,972	2,248	4,49	400	0,846	2633	2232,7	179,75	82,34	83,19	34,26	20,86	0,8559
Data z analytického výpočtu												
2,758	2,073	4,6	400	0,86	2633	2200	175,1	80,5	98,3	29,9	11	0,8542

2.8 Zhodnocení výsledků analytických výpočtů

Nejmenších odchylek všech provedených analytických výpočtů bylo dosaženo při výpočtu ztrát v železe. Naopak velké odchylky bylo dosaženo při analytickém výpočtu ztrát v rotoru, kdy vypočtené ztráty převyšují naměřené ztráty o asi 15 W (+18%). To je způsobeno tím, že není známa přesná hodnota teploty rotoru při jmenovitém zatížení a není tak možné přesně stanovit změnu rezistivity rotorové části s teplotou. Nemůže být také uvažováno pouze čistého hliníku, jako vodiče rotorové klece, neboť rezistivita hliníku po zalití do drážek se poněkud zvětší, vlivem nehomogenit při chladnutí hliníku v úzkém prostoru drážek v rotoru. Výpočet v programu RMxpert také udává vyšší hodnotu ztrát v rotoru o asi 5 W (+6%), což je jisté „předimenzování“ tohoto parametru pro budoucí měření na reálném stroji.

Další významnější odchylky bylo dosaženo při analýze ztrát ve vinutí programem RMxpert, který je udává o 19 W nižší (relativně o 9 %), než jsou podle měření. Toto je způsobeno tím, že program neumí zohlednit délku závitu jednotlivých cívek statorového vinutí a provede výpočet pro nejkratší možnou cestu jednotlivých závitů (není zohledněna technologie výroby vinutí). Toto lze do jisté míry ovlivnit zadáním pevné délky půlzávitu při modelování stroje k dosažení přesnějších výsledků. Dále program RMxpert neumožňuje analyticky vypočítat ztráty ventilační, třením a přídatné ztráty, jejichž velikost jsem zadal ručně ze známých hodnot z měření.

Další nepřesnosti je dosaženo i při použití empirického vzorce pro výpočet přídatných ztrát, kdy se uvažují o velikosti 0,5% jmenovitého výkonu (podle již neplatné normy a podle některé z literatury zabývající se návrhem elektrických strojů [1], i když některá udává [2] rozmezí 0,5 až 2%), ale ve skutečnosti jsou o 9 W větší.

3 APLIKACE NAVRHOVANÝCH ZMĚN PRO ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI

V předešlých semestrálních pracích jsem pro stávající motor navrhl použití dvouvrstvého vinutí, díky kterému se rozšířením jedné fáze do více drážek sníží vliv vyšších prostorových harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře na chod stroje. Jako první jsem v programu RMxpert namodeloval toto vinutí, ke zjištění celkové účinnosti. Dále jsem navrhoval jiný počet rotorových tyčí v kleci (18 nebo 20) a jiný materiál tyčí (měď). Jako poslední změnu jsem navrhoval změnu materiálu pro magnetický obvod stroje a to plechy M400-50A popřípadě M250-50A, které mají menší měrné ztráty. Každá změna byla modelována zvláště a jednotlivé výsledky z výstupních dat jsou uvedeny v následujících kapitolách.

3.1 Použití dvouvrstvého vinutí

Při prvotním modelování dvouvrstvého vinutí byl ponechán stávající počet závitů, tj. 46 na drážku. V případě dvou vrstev se tento počet rozdělí na polovinu, tedy každá cívka vinutí bude mít 23 závitů. Po editování vinutí a spuštění analýzy bylo zjištěno, že díky zmenšenému činiteli vinutí pro první harmonickou, byl magnetický obvod sycen více, než u stávajícího stroje, díky čemuž vzrostly ztráty v železe. Odpor vinutí naproti tomu klesl pod hodnotu stávajícího odporu vinutí, ale tato změna byla tak malá, že na výslednou účinnost neměla výraznější vliv. Výstupní parametry z analýzy programu jsou uvedeny v tabulce 9, kde jsou pro srovnání uvedeny i parametry magnetického obvodu analýzy původního stroje, bez použití dvouvrstvého vinutí.

Pro snížení velikostí magnetických indukcí byly přidány dva závity na cívku, tj. v drážce je 48 závitů (24 horní část drážky + 24 spodní část drážky). Tímto krokem se hodnoty indukce ve jhu a v zubech statoru přiblížily k hodnotám u stávajícího stroje, ovšem za cenu zvýšení odporu statorového vinutí. Ten se oproti první simulaci zvýšil a byl jen o pět tisíc ohmů nižší, než u stávajícího vinutí. Srovnání výsledných parametrů po přidání závitů je součástí tabulky 9. Protože nebyl simulací zjištěn vyšší vliv na zvýšení celkové účinnosti použitím dvouvrstvého vinutí, dále ho již při dalším modelování v programu RMxpert neuvažuji a každá změna na stroji je provedená zvláště. V dalším jsem se zabýval analýzou rozměrů statorové drážky, přičemž jsem navrhl nový tvar drážek a aplikoval jej v programu RMxpert.

Tabulka 9 – Parametry z analýzy programu RMXprt

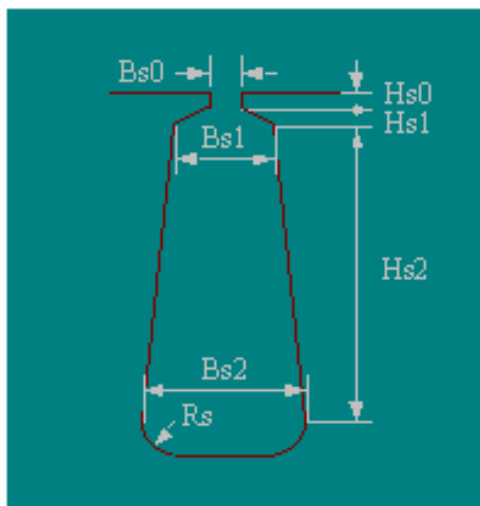
	Původní elektrický stroj	Dvouvrstvé vinutí (46 závitů)	Dvouvrstvé vinutí (48 závitů)
Odpor vinutí při jmenovité teplotě [Ω]	2,99775	2,85594	2,9921
Odpor vinutí při 20° C [Ω]	2,25495	2,14827	2,25069
Statorový proud [A]	4,21798	4,36716	4,19615
Ztráty ve vinutí statoru [W]	160,002	163,406	158,052
Ztráty v kleci rotoru [W]	87,9765	80,7474	88,393
Ztráty v železe [W]	83,5269	91,5807	83,2857
Mechanické ztráty [W]	34,2408	35,5019	35,2415
Rozptylové ztráty [W]	20,856	20,856	20,856
Celkové ztráty [W]	386,6022	392,092	385,828
Příkon [W]	2615,57	2628,41	2614,62
Výkon [W]	2228,97	2236,32	2228,79
Mechanický moment na hřídeli [N. m]	7,37083	7,37144	7,37143
Účinnost [%]	85,22	85,08	85,2434
Indukce v zubech statoru [T]	1,70631	1,755	1,70512
Indukce v zubech rotoru [T]	1,7275	1,7768	1,7263
Indukce ve jhu statoru [T]	1,48034	1,55672	1,47838
Indukce ve jhu rotoru [T]	1,33483	1,40371	1,3307
Indukce ve vzduchové mezeře [T]	0,714507	0,734897	0,71401

3.1.1 Analýza rozměrů statorové drážky

Ze známé hodnoty magnetického toku, který byl vyčíslen v prvním semestrálním projektu, jako $\Phi=5,44$ mWb, jsem určil minimální výšku statorového jha, přičemž uvažuji maximální velikost sycení jha $B_{JHO(s)}=1,5T$, jako:

$$h_{JHO(s)}' = \frac{\Phi}{B_{JHO(s)} \cdot 2 \cdot l_{FE} \cdot k_{FE}} = \frac{5,44 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 2,0 \cdot 1,0,96} = 18,9 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Současná výška statorového jha byla odečtena z technické dokumentace výrobce a nabývá hodnoty 18,7 mm (při konstantním magnetickém toku se tedy musí pro zachování rovnice (3.1) zvednout indukce ($B_{JHO(s)}$), tedy i ztráty ve jhu statoru budou vyšší, viz vztah 2.12). Pro dodržení hodnoty výše uvedené maximální velikosti sycení jha navrhuji drážku typu L, která bude mít menší hloubku, než stávající, ale do šířky bude mít parametry (velikosti) vyšší. Po analýze v programu RMxprt jsem navrhl statorovou drážku s rozměry uvedenými na obrázku 3.1.



Hs0	0.5	mm	0.5mm
Hs1	0.9	mm	0.9mm
Hs2	10	mm	10mm
Bs0	2.2	mm	2.2mm
Bs1	5.8	mm	5.8mm
Bs2	8.5	mm	8.5mm
Rs	1.2	mm	1.2mm

Obrázek 3.1 – Rozměry navrhované drážky statoru

Do nově navržené drážky se při zachovaném počtu závitů (tj. 46) vejde vinutí s průměrem jednoho vodiče 1 mm a nemusí být tedy použito dvou paralelních vodičů tak, jak je tomu u stávajícího vinutí (průměr menšího vodiče je $d_m = 0,63$ mm a průměr většího vodiče je $d_v = 0,71$ mm). Touto změnou klesne výsledná velikost odporu statorového vinutí a tím tedy i ztráty ve vinutí. Podrobnější informace z analýzy při použití této drážky a vodiče pro vinutí o výše uvedeném průměru jsou uvedeny v tabulce 10, kde jsou pro srovnání uvedeny i parametry stávajícího stroje.

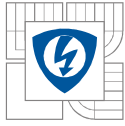
Tabulka 10 – Parametry z analýzy RMxpřt stroje s nově navrženou drážkou

	Původní elektrický stroj	Stroj s nově navrženou statorovou drážkou
Odpor vinutí při jmenovité teplotě [Ω]	2,99775	2,72995
Odpor vinutí při 20° C [Ω]	2,25495	2,0535
Ztráty ve vinutí statoru [W]	160,002	150,13
Ztráty v kleci rotoru [W]	87,9765	87,7367
Ztráty v železe [W]	83,5269	90,3147
Mechanické ztráty [W]	34,2408	34,2491
Rozptylové ztráty [W]	20,856	20,856
Celkové ztráty [W]	386,6022	382,451
Příkon [W]	2615,57	2611,83
Výkon [W]	2228,97	2229,38
Mechanický moment na hřídeli [N. m]	7,37083	7,3714
Účinnost [%]	85,22	85,357
Indukce v zubech statoru [T]	1,70631	1,7381
Indukce v zubech rotoru [T]	1,7275	1,73972
Indukce ve jhu statoru [T]	1,48034	1,54819
Indukce ve jhu rotoru [T]	1,33483	1,3696
Indukce ve vzduchové mezeře [T]	0,714507	0,703793

Z programu byla zjištěna hodnota činitele plnění drážky 67 %, při použití drážkové izolace o tloušťce 0,18mm (TufQUIN120 s dielektrickou pevností 0,8 kV, do teploty až 200°C), klínku drážky o tloušťce 0,3 mm a oboustranné tloušťce izolace vodiče 0,051 mm, což je hodnota, která podle literatury [2] je vhodná pro strojní navíjení.

3.2 Změna počtu rotorových tyčí

Z analýzy stroje, která byla provedena v prvním semestrálním projektu a podle doporučení literatury [2 a 4] navrhuji použít v rotoru namísto stávajících 19 tyčí jiný počet a to 18, nebo 20, který je doporučován pro případy dvoupólového stroje s 24 drážkami na statoru a se zešíkmenými drážkami na rotoru. Pro tento případ jsem navrhl nové rozměry drážek v rotorovém magnetickém



obvodu pro tyče klece nakrátko, při zachované ploše pro 19 tyčí. Plochu půdorysu rotorových tyčí vypočtu, jako:

$$S_{19} = 19 \cdot S_{1/19} = 19.53 = 1007 \text{ mm}^2 \quad (3.2)$$

Při zachované celkové ploše, budou jednotlivé plochy tyčí pro případ 18 tyčí:

$$S_{1/18} = \frac{S_{19}}{18} \cong 56 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

A pro případ 20 tyčí:

$$S_{1/20} = \frac{S_{19}}{20} \cong 50 \text{ mm}^2 \quad (3.4)$$

Drážková rozteč pro případ 18 tyčí při známém vnějším průměru rotoru (D_{or}) a velikosti vzduchové mezery (δ) bude:

$$\tau_{dR18} = \frac{\pi \cdot (D_{or} - 2 \cdot \delta)}{18} = \frac{\pi \cdot (72 - 2 \cdot 0,3)}{18} \cong 12,46 \text{ mm} \quad (3.5)$$

A pro 20 tyčí:

$$\tau_{dR20} = \frac{\pi \cdot (D_{or} - 2 \cdot \delta)}{20} = \frac{\pi \cdot (72 - 2 \cdot 0,3)}{20} \cong 11,22 \text{ mm} \quad (3.6)$$

Šířka rotorových zubů při 18 tyčích, max. indukci ve vzduchové mezeře (B_δ) a zvolené max. dovolené indukci v zubech rotoru $B_{tr}=1,7 \text{ T}$ bude:

$$b_{tr18} = \frac{B_\delta}{k_{Fe} \cdot B_{tr}} \cdot \tau_{dR18} = \frac{0,7}{0,96 \cdot 1,7} \cdot 12,46 \cong 5,34 \text{ mm} \quad (3.7)$$

a šířka rotorových zubů při 20 tyčích:

$$b_{tr20} = \frac{B_\delta}{k_{Fe} \cdot B_{tr}} \cdot \tau_{dR20} = \frac{0,7}{0,96 \cdot 1,7} \cdot 11,22 \cong 4,81 \text{ mm} \quad (3.8)$$

První rozměr rotorové drážky při použití 18 tyčí potom bude:

$$B_{s2(18)} = \frac{\pi \cdot (D_{or} - 2 \cdot \delta - 2 \cdot H_{S0}) - 18 \cdot b_{tr18}}{18 + \pi} \quad (3.9)$$

$$B_{s2(18)} = \frac{\pi \cdot (72 - 2 \cdot 0,3 - 2 \cdot 0,8) - 18 \cdot 5,34}{18 + \pi} \cong 5,8 \text{ mm} \quad (3.10)$$

A pro případ použití 20 tyčí:

$$B_{s2(20)} = \frac{\pi \cdot (72 - 2 \cdot 0,3 - 2 \cdot 0,8) - 20 \cdot 4,81}{20 + \pi} \cong 5,3 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Ze srovnání nově vypočtených rozměrů a stávajících rozměrů z nepřímé úměrnosti získám druhý rozměr rotorové drážky, pro případ 18 tyčí bude:

$$B_{s1(18)} = \frac{B_{s2(18)} \cdot B_{s1(19)}}{B_{s2(19)}} = \frac{5,8 \cdot 2,5}{5,6} \cong 2,6 \text{ mm} \quad (3.12)$$

Podobně pro druhý rozměr rotorové drážky v případě použití 20 tyčí bude:

$$B_{s1(20)} = \frac{B_{s2(20)} \cdot B_{s1(19)}}{B_{s2(19)}} = \frac{5,3 \cdot 2,5}{5,6} \cong 2,4 \text{ mm} \quad (3.13)$$

Ze známých hodnot průřezů jednotlivých tyčí (4.3), (4.4) lze vyčíslit poslední rozměr rotorových drážek (výšku H_{s2}), pro případ 18 tyčí, ze vzorce:

$$S_{\frac{1}{18}} = \frac{\pi}{8} \cdot (B_{s1(18)}^2 + B_{s2(18)}^2) + H_{s2(18)} \cdot B_{s1(18)} + \frac{(B_{s2(18)} - B_{s1(18)})}{2} \cdot H_{s2(18)} \quad (3.14)$$

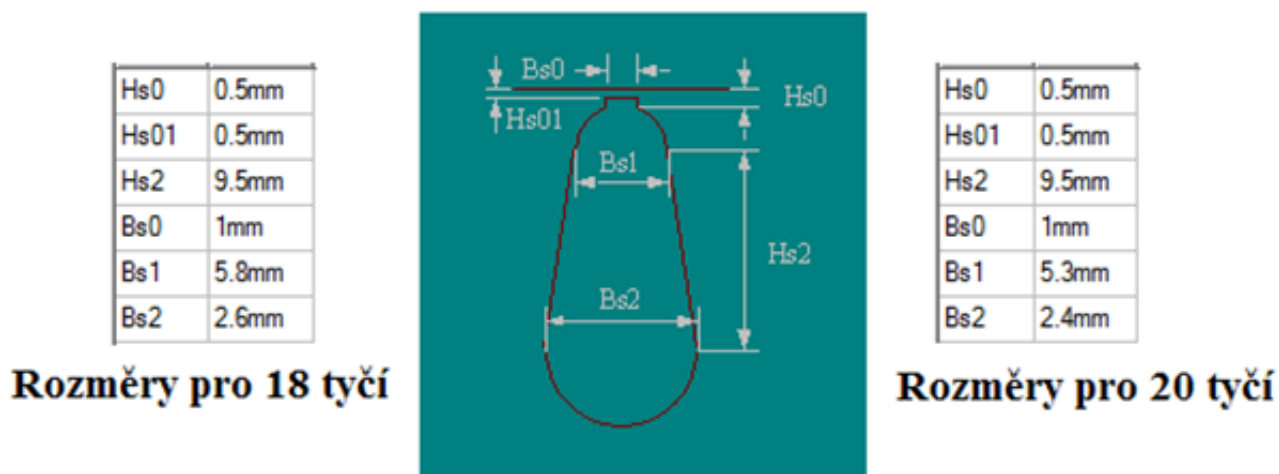
Po dosazení a vyčíslení dostaneme pro 18 tyčí:

$$H_{s2(18)} = 9,5 \text{ mm} \quad (3.15)$$

, a pro 20 tyčí:

$$H_{s2(20)} = 9,5 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Nově navrhované průřezy tyčí s označením rozměrů jsou zobrazeny na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 – Nové rozměry rotorové drážky pro různý počet tyčí klece

Nové rozměry drážek rotoru jsem postupně zadal do programu RMxpert i se změnou materiálu klece (měď, při zachování parametrů statoru stávajícího stroje a provedl analýzu. Výsledky z této analýzy jsou v tabulce 11.

Tabulka 11 – Parametry elektrického stroje s různým počtem rotorových tyčí

	Původní elektrický stroj	Rotor s 18 (Cu) tyčemi	Rotor s 20 (Cu) tyčemi
Odpor vinutí při jmenovité teplotě [Ω]	2,99775	2,99775	2,99775
Odpor vinutí při 20° C [Ω]	2,25495	2,25495	2,25495
Statorový proud [A]	4,21798	4,13229	4,10996
Ztráty ve vinutí statoru [W]	160,002	153,567	151,912
Ztráty v kleci rotoru [W]	87,9765	50,476	49,8816
Ztráty v železe [W]	83,5269	83,7636	83,8136
Mechanické ztráty [W]	34,2408	36,4955	36,5165
Rozptylové ztráty [W]	20,856	20,856	20,856
Celkové ztráty [W]	386,6022	345,158	342,98
Příkon [W]	2615,57	2545,08	2543,11
Výkon [W]	2228,97	2199,92	2200,13
Mechanický moment na hřídeli [N. m]	7,37083	7,1606	7,15941
Účinnost [%]	85,22	86,4382	86,5134
Indukce v zubech statoru [T]	1,70631	1,71245	1,71405
Indukce v zubech rotoru [T]	1,7275	1,72377	1,72259
Indukce ve jhu statoru [T]	1,48034	1,48738	1,48658
Indukce ve jhu rotoru [T]	1,33483	1,35246	1,33229
Indukce ve vzduchové mezeře [T]	0,714507	0,71708	0,71775

3.3 Změna materiálu magnetického obvodu

V předchozích semestrálních projektech jsem navrhoval použít na místo stávajícího materiálu magnetického obvodu M800-50A materiál s menšími měrnými ztrátami při stejném sycení, konkrétně materiál M400-50A. Tento materiál jsem nadeřinoval podle parametrů B-H křivky od výrobce a závislosti velikostí měrných ztrát na magnetické indukci, podobně, jako byl nadeřinován materiál stávající. Dále jsem nadeřinoval i materiál M250-50A, ze kterého firma Cogent vyrábí poslední řadu plechů o tloušťce 0,5 mm.

Po nadefinování materiálů jsem spustil analýzy a prověřil velikost výstupních parametrů. Na jejich základě jsem došel k závěru, že maximální účinnosti bude dosaženo při této kombinaci výše uvedených změn:

- 1) změna rozměrů statorových drážek a průměru vodiče vinutí na nově vypočtené v kapitole 3.1.1.
- 2) změna počtu rotorových tyčí na 20 a s nimi nově navržené rozměry, viz kapitola 3.2.
- 3) změna materiálu kotvy nakrátko, na měď, viz kapitola 3.2.
- 4) změna materiálu magnetického obvodu na M250-50A.

Dále bylo zjištěno, že při této kombinaci spolu se zachováním jednovrstvého vinutí se 46 závitů je statorový magnetický obvod nadměrně sycený a navrhuji proto zvýšit počet závitů na 47. Při dodržení těchto parametrů bylo v programu RMxprt dosaženo velikosti výsledné účinnosti **88,4 %**.

Při zachování stávajících parametrů drážek statoru a změně pouze rotorové části vychází účinnost poněkud snížená, o hodnotě 86,4 % (20 tyčí, měděná klec, materiál magnetického obvodu rotoru M250-50A).

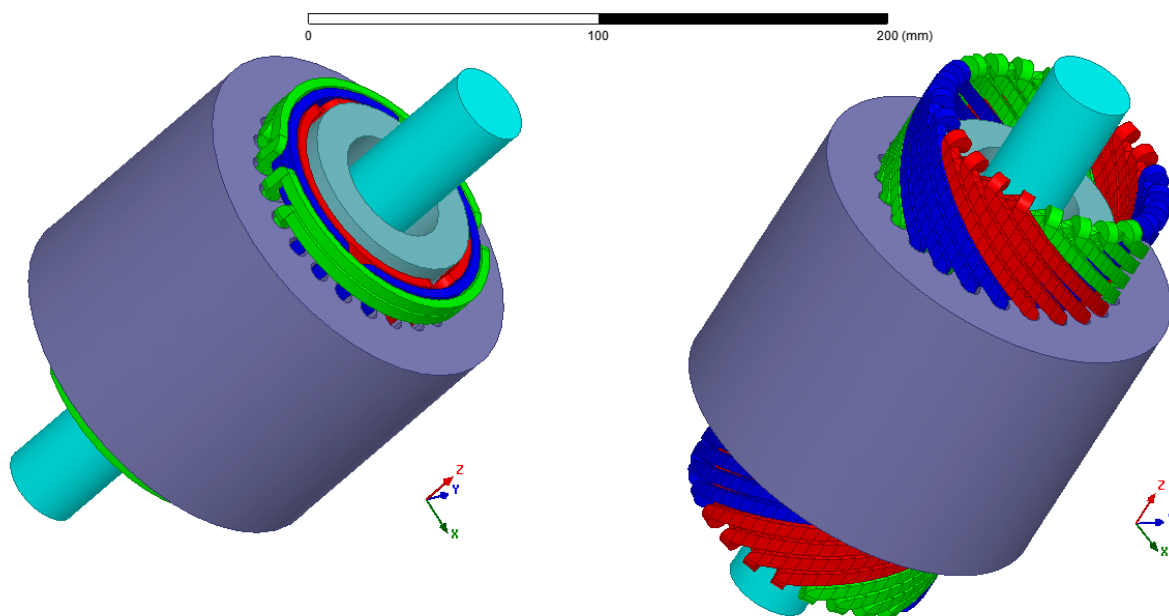
3.4 Analýza pomocí 3D modelu v programu Maxwell 3D

Protože všechny výše uvedené změny stávajícího stroje by bylo nesnadné realizovat a následně analyzovat z ekonomických a časových důvodů (změna tvaru plechů magnetického obvodu by vyžadovala vyrobení nových nástrojů pro střih, drahá technologie tlakového lítí mědi), byla po konzultaci s vedoucím diplomové práce a firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna provedena pouze změna stávajícího vinutí za vinutí dvouvrstvé.

Protože program RMxprt při analytickém výpočtu nepočítá s natočením rotorových tyčí a neuvažuje vliv vyšších prostorových harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který by se použitím vícevrstvého vinutí měl snížit, vytvořil jsem dále model elektrického stroje v programu Maxwell 3D a provedl analýzu i pro různá natočení rotorových tyčí vůči statorovým drážkám, přičemž jsem postupně měnil natočení. Program Maxwell 3D po namodelování stroje a definování vnitřních a vnějších oblastí, provádí výpočet parametrů stroje za pomoci numerické metody konečných prvků.

Při tvorbě modelu jsem zanechal původní počet rotorových tyčí, tj. 19. Začal jsem analýzou stroje s nenatočenými drážkami a postupně měnil natočení o jednu statorovou (rotorovou) drážku a dvě statorové (rotorové) drážky. Dále jsem namodeloval i stávající asynchronní motor s jednovrstvým vinutím na statoru k porovnání obou modelů navzájem i k porovnání parametrů jednotlivých ztrát ve stroji namodelovaném, se strojem reálným, který byl laboratorně změřen. Modely těchto strojů jsou na obrázku 3.3. Vzhledem k náročnosti výpočtu těchto modelů byl výpočet prováděn na výpočetním serveru VUT, kde je program nainstalován. Všechny výše vypočtené varianty (změna tvaru statorových drážek a změna počtu rotorových tyčí) jsem takto analyzovat nestihl z časových důvodů. Výpočet jednoho stroje trval přibližně dva a půl dne.

3D model jsem vytvořil pouze pro porovnání ztrát při různých natočeních stávajícího počtu rotorových tyčí, neboť toto nemohlo být reálně vyrobeno z časových a ekonomických důvodů.

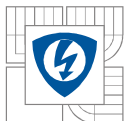


a) původní motor s jednovrstvým vinutím

b) motor s navrženým dvouvrstvým vinutím

Obrázek 3.3 – Modely strojů pro analýzu v programu Maxwell 3D

Výsledky analýz modelů ukazuje tabulka 12, ve které jsou červeně zvýrazněné případy, ve kterých se za čas analýzy, který byl nastaven od času 0 s do 100 ms, neustálila při jmenovitých otáčkách motoru (nastaveno 2893 min^{-1} , což je hodnota naměřených otáček při jmenovitém zatížení z měření) hodnota zatěžovacího momentu na hodnotě $7,37 \text{ N.m}$, ale na hodnotě menší (max. 7 N.m). Tímto vyšla menší hodnota proudu ve vinutí, a proto tyto dva případy změn natočení neuvažují. Ve všech případech pak vyšel i při ručně nastavené hodnotě odporu statorového vinutí nižší proud vinutím, což zavádí značnou chybu ve velikostech ztrát ve vinutí. Tato chyba je dána tím, že jsem nenakreslil statorové vinutí tak věrně, jaké je provedené ve skutečnosti. Ztráty v železe vychází také menší, neboť jsem do materiálu plechů nevnesl vliv opracování plechů při výrobě statorového a rotorového svazku (změna parametrů B-H křivky vlivem stříhu, kdy se mění struktura materiálu nejvíce na okrajích). Materiálové konstanty jsem uvažoval po celém objemu za konstantní, nabývající hodnoty dle výrobce, viz příloha P9. Další nepřesnosti se dopouštím také tím, že uvažuji hodnoty přídavných ztrát a ztrát ventilačních a třecích takových velikostí, jaké dosahovaly u měření na reálných strojích. I přes tyto chyby, které jsem se snažil odstranit různými změnami konstant před spuštěním analýz, jsem dospěl k závěru, že nejmenších celkových ztrát (jestliže neuvažují ztráty ve vinutí) by bylo dosaženo při natočení rotorových tyčí o jednu drážkovou rozteč statoru.

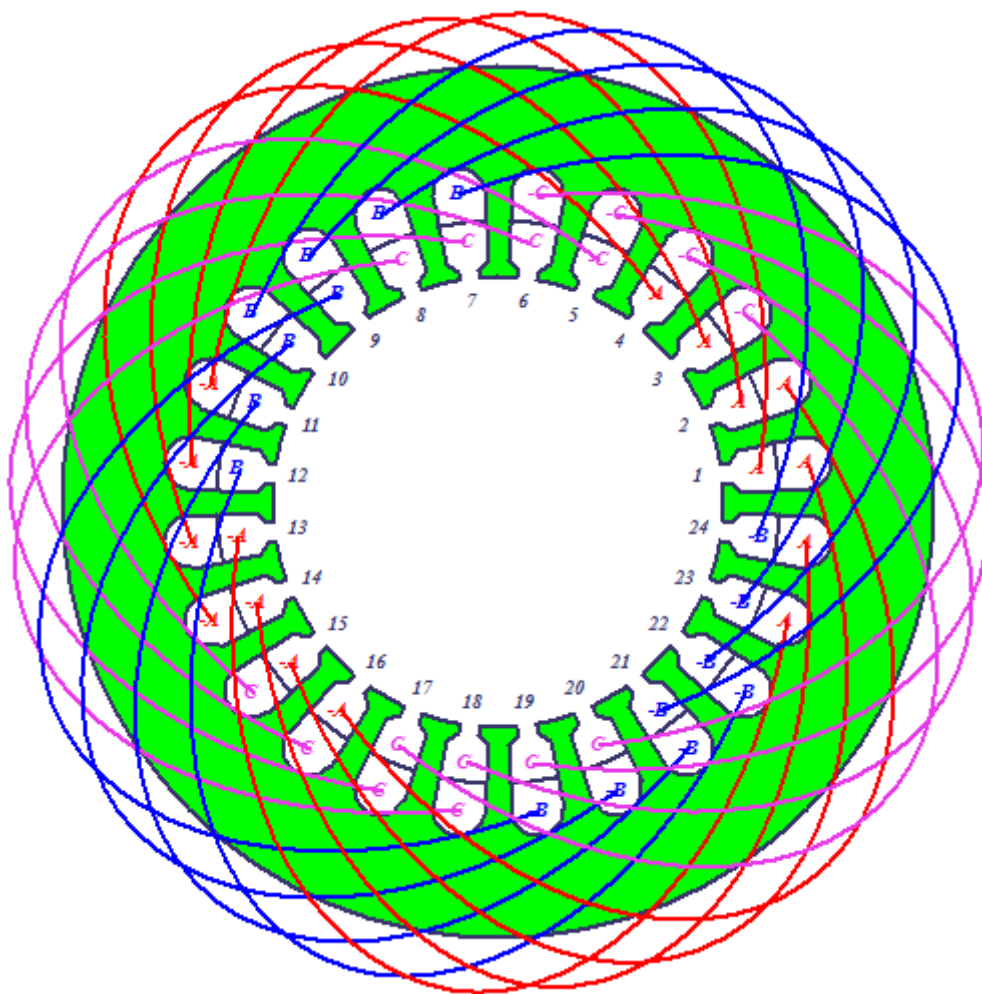


Tabulka 12 – Parametry reálných motorů a 3D modelů

Varianta stroje	Ztráty ve vinutí statoru	Ztráty v rotoru	Ztráty v železe	Ztráty ventilační a třením	Ztráty přídavné	Ztráty celkové
	P_S [W]	P_R [W]	P_{Fe} [W]	P_{rw} [W]	P_{LL} [W]	ΣP [W]
Reálný motor s jednovrstvým vinutím na statoru (TM90-2L)	179,75	83,19	82,34	34,26	20,86	400,4
Reálný motor s navrženým dvouvrstvým vinutím na statoru ("TM90-2L")	207,84	83,2	77,87	32,48	23,78	425,17
3D model motoru TM90-2L s jednovrstvým vinutím	155,45	85,7	53,06	34,26	20,86	349,33
3D model motoru "TM90-2L" s dvouvrstvým vinutím (bez natočených tyčí rotoru)	172,13	86,03	51,49	32,48	23,78	365,91
3D model motoru "TM90-2L" s dvouvrstvým vinutím (natočení tyčí rotoru o jednu drážkovou rozteč rotoru)	172,68	85,28	51,68	32,48	23,78	365,9
3D model motoru "TM90-2L" s dvouvrstvým vinutím (natočení tyčí rotoru o dvě drážkové rozteče rotoru)	166,99	76,38	52,47	32,48	23,78	352,1
3D model motoru "TM90-2L" s dvouvrstvým vinutím (natočení tyčí rotoru o jednu drážkovou rozteč statoru)	170,94	84,33	51,63	32,48	23,78	363,16
3D model motoru "TM90-2L" s dvouvrstvým vinutím (natočení tyčí rotoru o dvě drážkové rozteče statoru)	169,5	80,58	51,93	32,48	23,78	358,27

4 DOKUMENTACE PRO REALIZACI DVOUVRSTVÉHO VINUTÍ

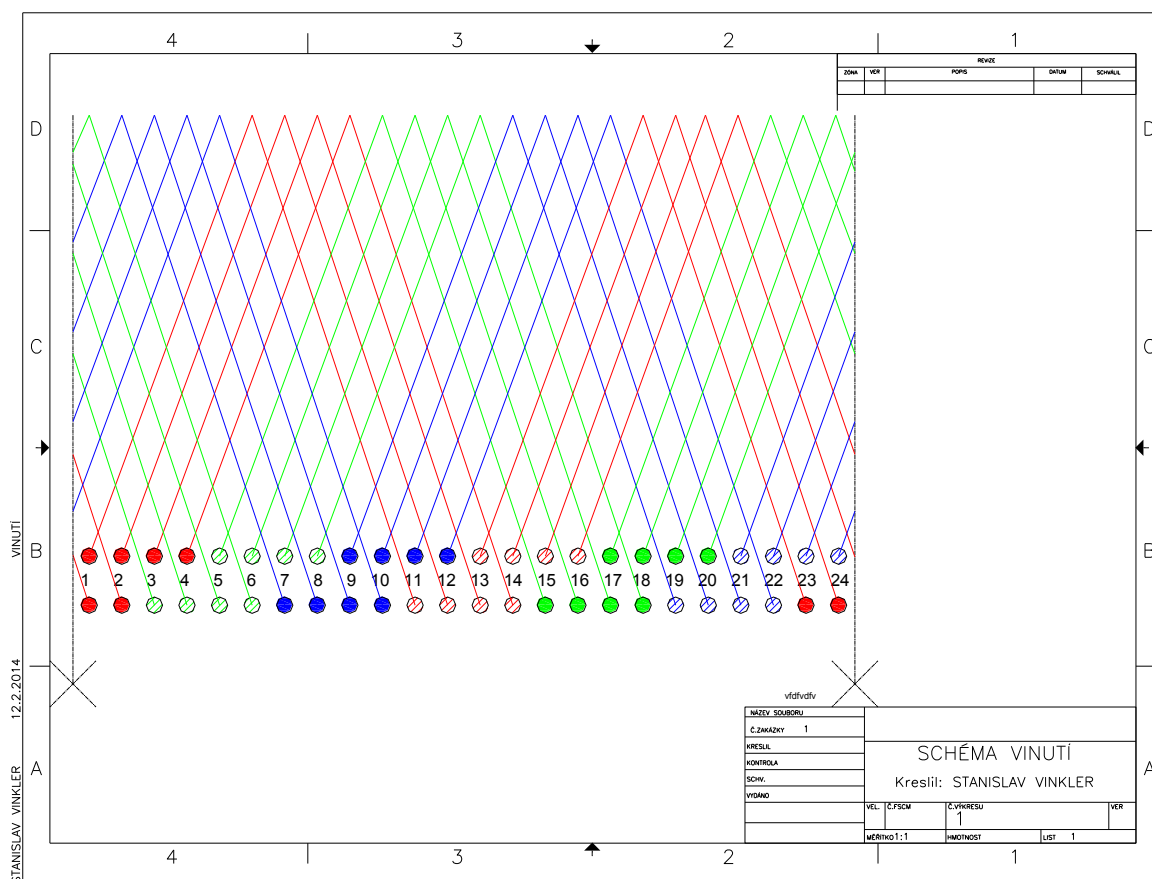
Pro realizaci technické dokumentace k výrobě dvouvrstvého vinutí jsem využil výstup editoru vinutí programu RMxpert, viz obrázek 4.1. Dále jsem vytvořil přehlednou tabulku zapojení cívek jednotlivých fází, viz tabulka 12 a v programu AutoCAD jsem nakreslil schéma vinutí, viz obrázek 4.2.



Obrázek 4.1– Schéma zapojení dvouvrstvého vinutí [z editoru programu RMxpert]

Tabulka 13 – Zapojení dvouvrstvého vinutí

Zapojení satorového vinutí				
Cívka	Fáze	Vstupní drážka	Výstupní drážka	Počet závitů
1	U	1 - horní	11 - spodní	24
2	U	2 - horní	12 - spodní	24
3	U	3 - horní	13 - spodní	24
4	U	4 - horní	14 - spodní	24
5	-W	5 - horní	15 - spodní	24
6	-W	6 - horní	16 - spodní	24
7	-W	7 - horní	17 - spodní	24
8	-W	8 - horní	18 - spodní	24
9	V	9 - horní	19 - spodní	24
10	V	10 - horní	20 - spodní	24
11	V	11 - horní	21 - spodní	24
12	V	12 - horní	22 - spodní	24
13	-U	2 - spodní	16 - horní	24
14	-U	1 - spodní	15 - horní	24
15	-U	24 - spodní	14 - horní	24
16	-U	23 - spodní	13 - horní	24
17	W	6 - spodní	20 - horní	24
18	W	5 - spodní	19 - horní	24
19	W	4 - spodní	18 - horní	24
20	W	3 - spodní	17 - horní	24
21	-V	10 - spodní	24 - horní	24
22	-V	9 - spodní	23 - horní	24
23	-V	8 - spodní	22 - horní	24
24	-V	7 - spodní	21 - horní	24

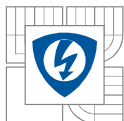


Obrázek 4.2– Schéma dvouvrstvého vinutí pro výrobu

Průměry vodičů dvouvrstvého vinutí jsem vypočetl na základě znalosti činitele plnění drážky původního vinutí ($k_{pdr} = 0,674$) a čisté plochy drážky ($S_{dr} = 69,3 \text{ mm}^2$) tak, aby se nezměnil činitel plnění. Jeden závit bude tvořen dvojicí vodičů, přičemž tato kombinace byla konzultována s výrobcem, jako lepší varianta z hlediska technologie výroby (na místo použití jediného vodiče o větším průměru).

Návrh vinutí je zobrazen v tabulce 13. Při výrobě vinutí podle prvotního návrhu se vinutí nepodařilo vyrobit. Konzultací s výrobcem bylo zjištěno, že se při prvotně navržených rozměrech vinutí do drážek vešlo, ale byla drobně porušena izolace vodičů. Vinutí by tak nevyhovělo napěťové zkoušce a výrobce proto vyrobil vinutí s jinými rozměry vodičů. Hlavním důvodem byla nutnost přítomnosti mezifázové izolace, jejíž přesné rozměry jsem získal od výrobce a které jsou dále uvedeny v tabulce 13. Varianta číslo 2 (druhý návrh pro dvouvrstvé vinutí), kterou udává tabulka 13, nebyla realizována zřejmě z důvodů nedostatku skladových zásob vodičů pro vinutí. Na výrobu takového vinutí by se muselo déle čekat z důvodu objednávky žádaného průměru vodiče.

Statorové vinutí potom doporučuji doplnit teplotním čidlem např. typu KTY 80-130 (rozsah -40°C až +300°C) pro případnou ochranu vinutí proti nadměrnému oteplení a dále pro informaci o teplotě vinutí během měření účinnosti, kdy je požadována teplotní stabilita stroje.

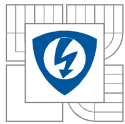


Tabulka 14 – Varianty návrhů průměrů vodičů dvouvrstvého vinutí

	Počet vodičů v drážce (N_{1C})	Průměr menšího vodiče bez izolace (d_1) [mm]	Průměr většího vodiče bez izolace (d_2) [mm]	Plocha zabraná vodiči v drážce [mm ²]	Čistá plocha drážky [mm ²]	Činitel plnění drážky (bez izolace)
		Průměr menšího vodiče s izolací (d_1)' [mm]	Průměr většího vodiče s izolací (d_2)' [mm]			Činitel plnění drážky (s izolací)
Stávající jednovrstvé vinutí	46	0,63	0,71	41,446	69,3	0,598
		0,6705	0,7525	46,728		0,674
První návrh pro dvouvrstvé vinutí	48	0,6	0,71	41,477	69,3	0,599
		0,639	0,7525	46,780		0,675

Čistá plocha drážky snižená o plochu (šířka x tloušťka mezifázové izolace) = $13 \times 0,2 = 2,6 \text{ mm}^2$

Druhý návrh pro dvouvrstvé vinutí	48	0,63	0,65	39,331	66,7	0,590
		0,6705	0,691	44,498		0,667
Realizované dvouvrstvého vinutí	48	0,63	0,6	36,331	66,7	0,545
		0,6705	0,639	41,179		0,617



Příklad výpočtu pro žlutě označené hodnoty tabulky 13:

Plocha zabraná vodiči v drážce:

$$N_{1C} \cdot [(d_1')^2 + (d_2')^2] = 48 \cdot [(0,6705)^2 + (0,639)^2] = \underline{\underline{41,179}} \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

Při známé hodnotě čisté plochy drážky, která byla zmenšená o hodnotu plochy mezifázové izolace, vyjde činitel plnění drážky (k_p):

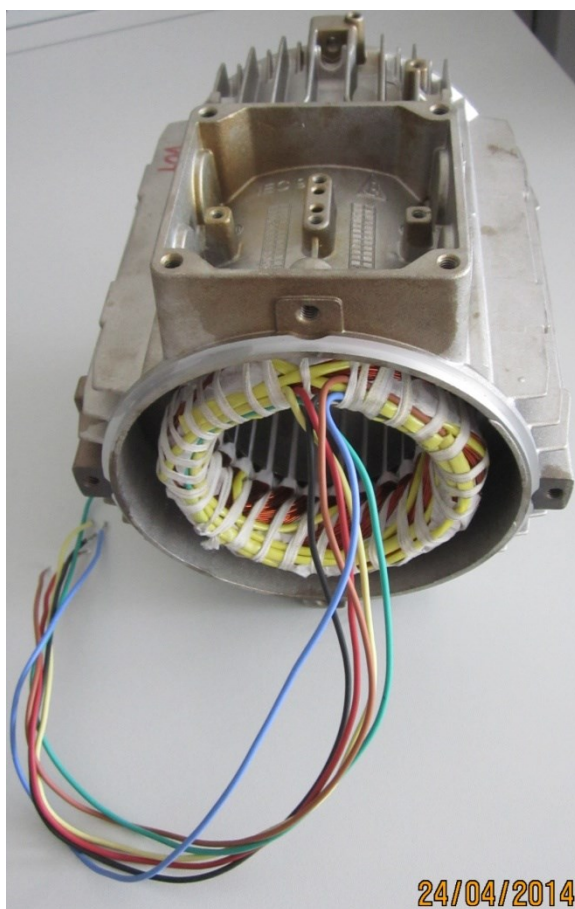
$$k_p = \frac{\text{Plocha zabraná vodiči v drážce}}{\text{Čistá plocha drážky}} = \frac{41,179}{66,7} = \underline{\underline{0,617}} \quad (4.2)$$

Při výpočtech byly použity standardizované průměry vodičů a hodnoty tloušťky izolace dle literatury [4]. Hodnoty zejména tloušťky izolace se mohou značně lišit v závislosti na výrobci vodičů.

Výše uvedená dokumentace, spolu s rozměry vodičů byla předána výrobci motoru, který ji shledal jako postačující pro výrobu dvouvrstvého vinutí.

5 MĚŘENÍ NA MOTORU S DVOUVRSTVÝM VINUTÍM

Na dodaném motoru s dvouvrstvým vinutím na statoru (viz obrázek 5.1) bylo provedeno měření za stejných podmínek, jako u prvního a druhého měření. Před zahájením měření byl do statorové části nového motoru vložen rotor z původního motoru a byly připojeny vodiče vinutí ke svorkovnici. Jednotlivé části měření jsem rozdělil do následujících kapitol.



Obrázek 5.1 – Dvouvrstvé statorové vinutí na dodaném vzorku

5.1 Parametry z přímého měření

Při přímém měření byl měřen elektrický výkon, který byl přiváděn do stroje a zároveň mechanický výkon dodávaný strojem. Parametry z tohoto měření byly odečteny po dvou hodinách chodu stroje při jmenovitém zatížení, které bylo nastaveno stejné, jako u motoru s jednovrstvým vinutím na statoru, tj. 7,37 N. m. Po teplotní stabilizaci stroje při jmenovitém zatížení bylo odečteno z měřicích přístrojů pět hodnot (s odstupem času 5 minut), z nichž byl

poté vypočítán průměr pro dosažení přesnější zkušební hodnoty. Odečtené parametry z prvního měření jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 – Parametry z přímého měření na motoru s dvouvrstvým vinutím na statoru

Číslo měření [i]	P ₁ [W]	Σ(P ₁)/i [W]	n [min ⁻¹]	Σ(n)/i [min ⁻¹]	M _Z [N.m]	Σ(M _Z)/i [N.m]
1	2656,4	2655,92	2885	2888,2	7,371	7,372
2	2655,9		2889		7,375	
3	2655,6		2886		7,365	
4	2656,1		2887		7,374	
5	2655,6		2894		7,375	

Výkon na hřídeli (P₂), je (dosazovány hodnoty z tabulky 13):

$$P_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_Z \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7,372 \cdot 2888,2}{60} = 2229,7 \text{ W} \quad (5.1)$$

Účinnost z přímého měření (η_p) je potom:

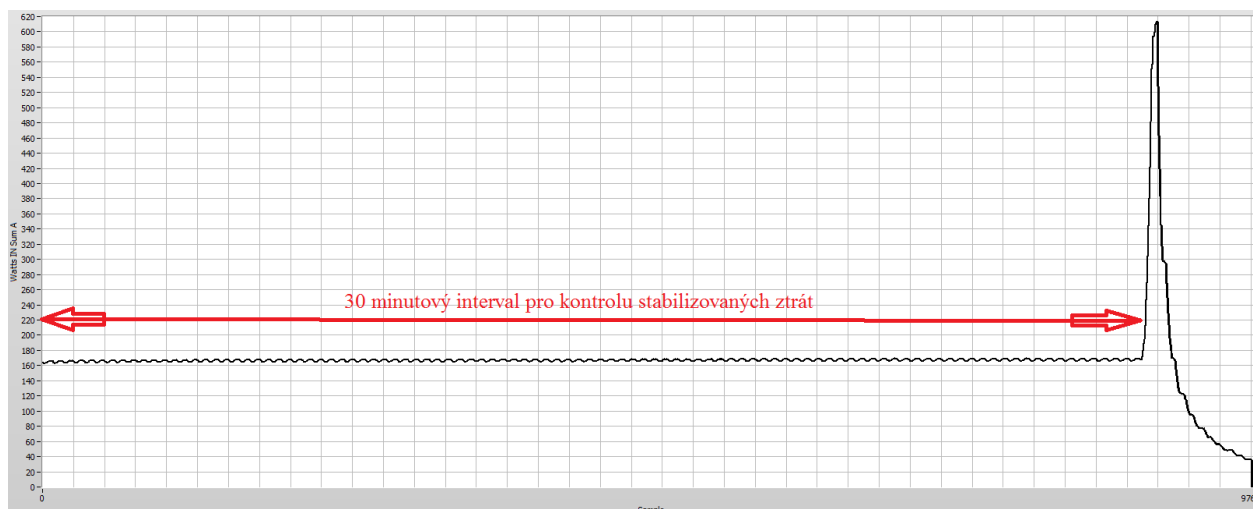
$$\eta_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2229,7}{2655,92} \cong 0,84 \quad (5.2)$$

Tato hodnota účinnosti, vyjádřená v procentech vykazuje hodnotu menší o 0,7 % proti hodnotě, která byla naměřená a vypočtená u prvotního motoru.

V dalších kapitolách jsem se věnoval vyčíslení jednotlivých složek ztrát pro určení velikosti účinnosti z nepřímého měření dle EN 60034-2-1, tak, jak je popsáno i v kapitole 1.3.

5.2 Určení velikosti konstantních ztrát

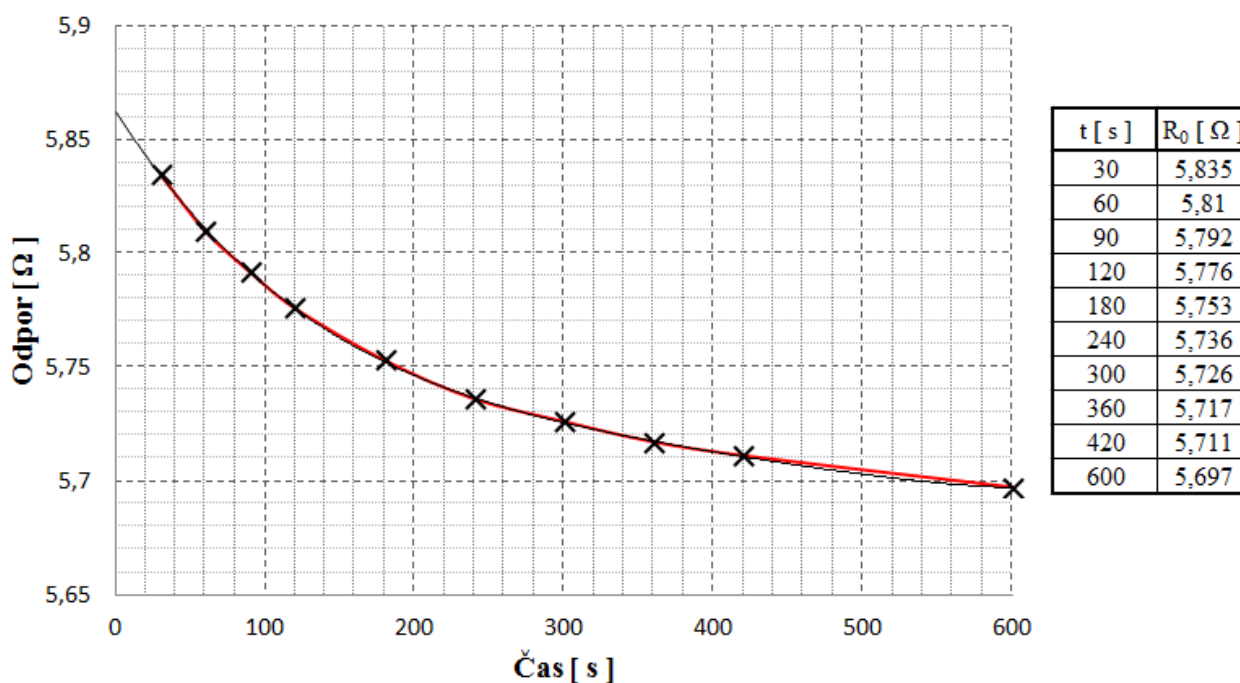
Měření naprázdno neprobíhalo v tomto případě ihned po zatěžovací zkoušce. Dle normy jsou ztráty naprázdno považovány za stabilizované také tehdy, mění-li se příkon naprázdno při měření ve dvou po sobě jdoucích 30 minutových intervalech o 3% nebo méně. Měření tedy probíhalo až po tomto ustálení, které je znázorněno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 – Stabilizace příkonu před zahájením měření naprázdno [z programu M-Test7]

Stroj byl měřen při 11 hodnotách napájecího napětí, jak dále ukazuje tabulka 16. Na konci měření naprázdno byl naměřen odpor vinutí ihned po nejnižším nastaveném vstupním napětí naprázdno, tj. 80,29 V, přičemž jsem získal extrapolací (viz obrázek 5.3) hodnotu odporu vinutí $R_0 = 5,86 \Omega$. Ten je dále použit pro výpočet ztrát ve vinutí na prázdko a pro stanovení celkových konstantních ztrát.

Určení hodnoty odporu vinutí po zkoušce naprázdno



Obrázek 5.3 – Odpor vinutí po zkoušce naprázdno

Tabulka 16 – Parametry měření naprázdno

Nastavené napětí U_0 [V]	Proud I_0 [A]	Příkon na prázdnou P_0 [W]	Ztráty ve vinutí na prázdnou P_{S0} [W]	Konstantní ztráty P_K [W]
500,73	6,092	612,200	326,219	285,981
450,97	3,547	296,700	110,589	186,111
400,67	2,123	169,600	39,618	129,982
360,78	1,538	122,700	20,792	101,908
320,88	1,196	94,600	12,573	82,027
280,98	0,955	76,800	8,017	68,783
240,57	0,773	66,000	5,252	60,748
200,5	0,623	56,200	3,412	52,788
160,43	0,505	48,200	2,242	45,958
120,36	0,409	41,500	1,470	40,030
80,29	0,376	36,100	1,243	34,857

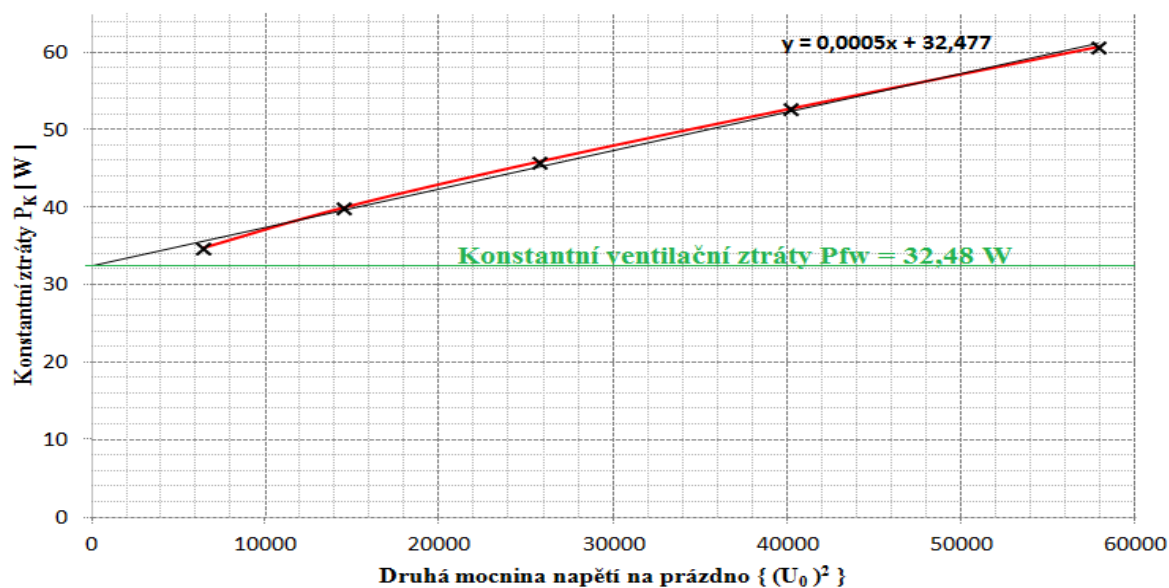
Příklad výpočtu pro označené hodnoty tabulky 16, přičemž hodnoty U_0, I_0, P_0 byly měřeny výkonovým analyzátozem a hodnota odporu R_0 stanovena extrapolací, viz obrázek 5.3:

$$P_{S0} = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_0 = 1,5 \cdot 2,123^2 \cdot 5,86 = 39,618 \text{ W} \quad (5.3)$$

$$P_K = P_0 - P_{S0} = 169,6 - 39,618 = 129,982 \text{ W} \quad (5.4)$$

Dále jsem za pomoci dat v tabulce 16, sestrojil graf závislosti $P_K = f(U_0)^2$, potom extrapolací a průsečíkem s osou nulového napětí jsem určil ztráty třením a ztráty ventilační P_{fw} . Z obrázku 5.4 je zřejmé, že ztráty třením a ventilací mají velikost $P_{fw} \approx 32,48 \text{ W}$

GRAF ZÁVISLOSTI $P_K = f\{(U_0)^2\}$



Obrázek 5.4 – Velikost ztrát ventilací a třením

V dalším kroku jsem z hodnot napětí naprázdno (mezi hodnotami 60% až 125% jmenovitého napětí) sestrojil graf závislosti ztrát v železe (P_{Fe}) na napětí U_0 , viz obrázek 5.7 níže pro pozdější určení ztrát v železe při zatížení, kdy se uvažuje i velikost úbytku napětí ve statorovém vinutí. Jednotlivé parametry v grafu na obrázku 5.7 jsou brány z tabulky 17.

Tabulka 17 – Parametry pro zjištění ztrát v železe

Nastavené napětí U_0 [V]	Konstantní ztráty P_K [W]	Ztráty třením a ventilací P_{fw} [W]	Ztráty v železe P_{FE} [W]
500,730	285,981	32,48	253,501
450,970	186,111	32,48	153,631
400,670	129,982	32,48	97,502
360,780	101,908	32,48	69,428
320,880	82,027	32,48	49,547
280,980	68,783	32,48	36,303
240,570	60,748	32,48	28,268

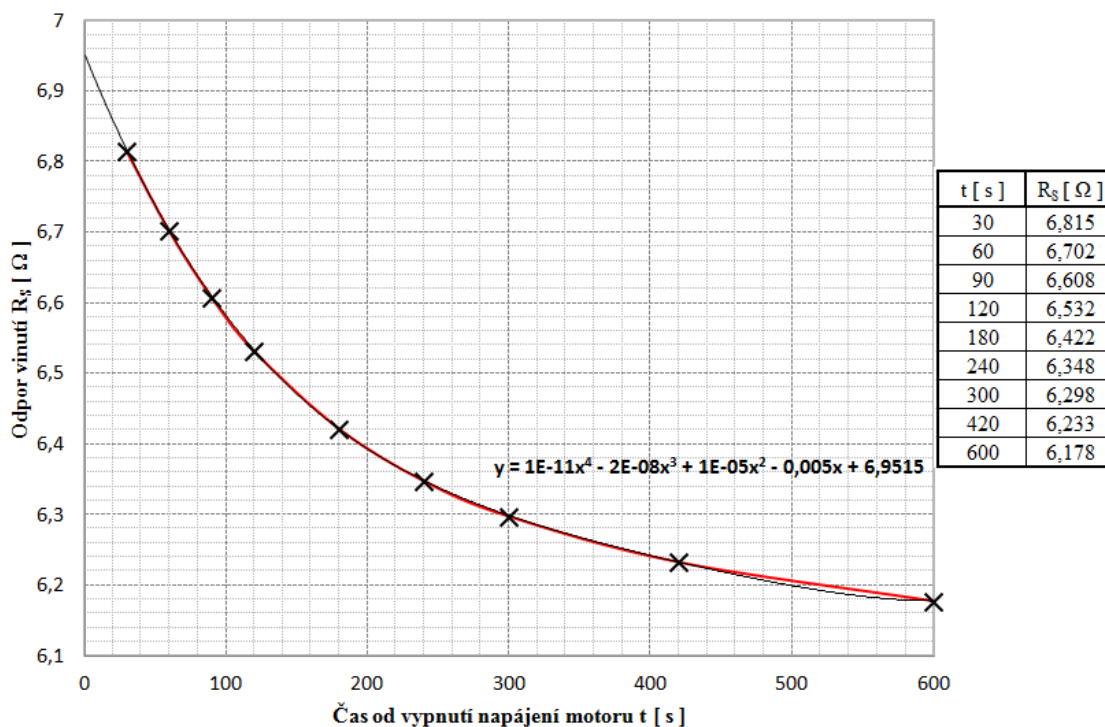
Příklad výpočtu pro označené hodnoty tabulky 17:

$$P_{FE} = P_K - P_{fw} = 129,982 - 32,48 = 97,502 \text{ W} \quad (5.5)$$

5.3 Určení ztrát při zatížení

Z naměřených hodnot velikosti odporu statorového vinutí na konci zatěžovací zkoušky, tj. po nastavené zátěži odpovídající 25% jmenovitého momentu jsem sestrojil závislost odporu statorového vinutí na čase po vypnutí napájení. Protože jsem odpor vinutí začal měřit až v čase 30 sekund od vypnutí, extrapoloval jsem hodnotu pro čas vypnutí ze známých hodnot a regresní křivky tak, jak je uvedeno na obrázku 5.5. Hodnota odporu statorového vinutí v čase $t=0s$ má velikost $R_s=6,95 \Omega$

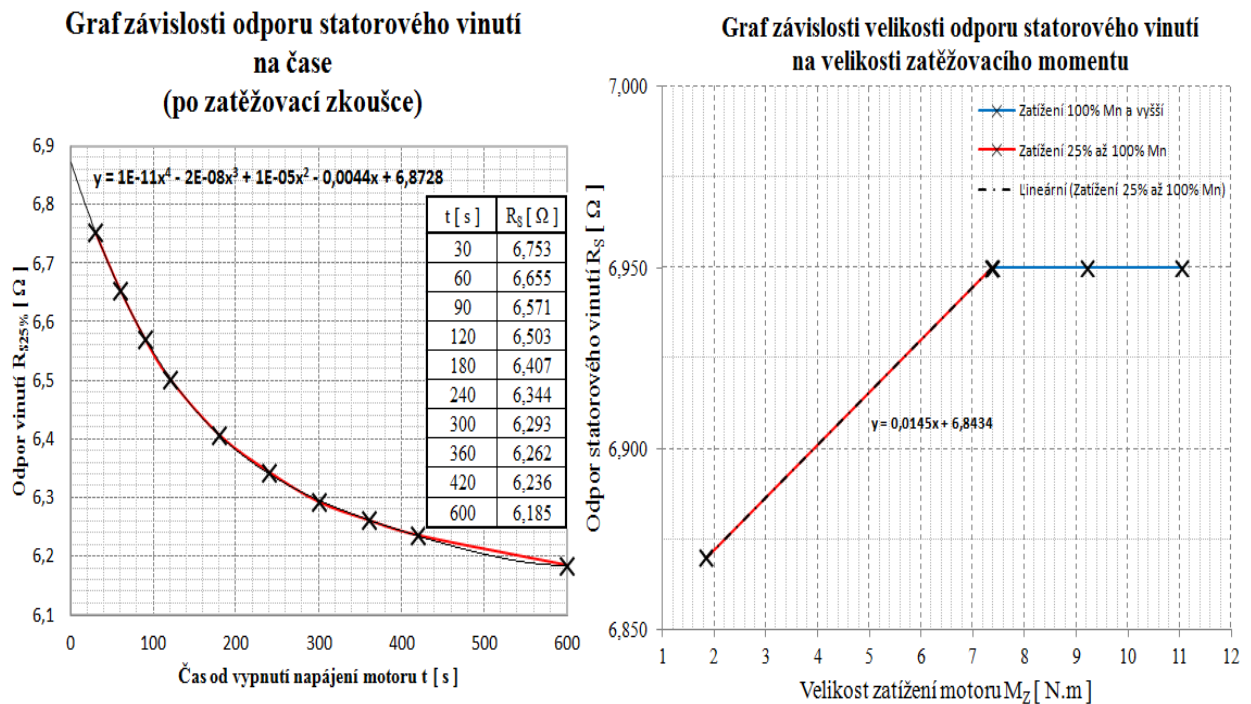
**Graf závislosti odporu satorového vinutí na čase
(po teplotní stabilizaci stroje)**



Obrázek 5.5– Odpor satorového vinutí po teplotní stabilizaci stroje

Dalším krokem analýzy naměřených dat je určení odporu satorového vinutí v závislosti na zatížení motoru, tj. analýza zkoušky křivky zatížení. Tato zkouška probíhala bezprostředně po zkoušce při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení, kdy se stroj postupně zatěžoval šesti různými momenty. Odpor satorového vinutí se změnil nejprve před zahájením zatěžování 150% momentu (tj. odpor odpovídá hodnotě stanovené při jmenovitém chodu stroje $\Rightarrow R_S = 6,95 \Omega$) a po odečtení nejnižšího zatížení. K tomuto jsem sestrojil graf závislosti odporu satorového vinutí na zatěžovacím momentu tak, jak je popsáno výše v kapitole 1.3.2 pro odečtení odporu satorového vinutí při různých hodnotách zatěžovacího momentu.

Tento graf je znázorněn na obrázku 5.6 spolu s tabulkou naměřených hodnot odporu satorového vinutí ihned po nastavení 25% jmenovitého zatěžovacího momentu. Hodnota tohoto odporu v čase $t=0s$ od vypnutí napájení motoru jsem získal znovu extrapolací naměřených hodnot odporu v závislosti na čase a má hodnotu $R_{S25\%} = 6,87 \Omega$ (viz obrázek 5.6). Při konstrukci grafu pro odečtení velikosti satorového vinutí při známé hodnotě zatěžovacího momentu jsem použil tabulku naměřených hodnot (viz tabulka 18).



Obrázek 5.6 – Velikost odporu satorového vinutí při známém zatěžovacím momentu

Tabulka 18 – Parametry z měření křivky zatížení

M_Z [N.m]	I [A]	R_S [Ω]	P_1 [W]	n [min ⁻¹]	n_2 [min ⁻¹]	s
11,04	6,467	6,950	4077,1	3000	2696	0,1014
9,205	5,412	6,950	3343,1	3000	2850	0,0492
7,368	4,465	6,950	2656,3	3000	2893	0,03651
5,533	3,606	6,924	1998	3000	2917	0,0261
3,695	2,88	6,897	1365,2	3000	2949	0,0171
1,839	2,311	6,870	751,6	3000	2976	0,008

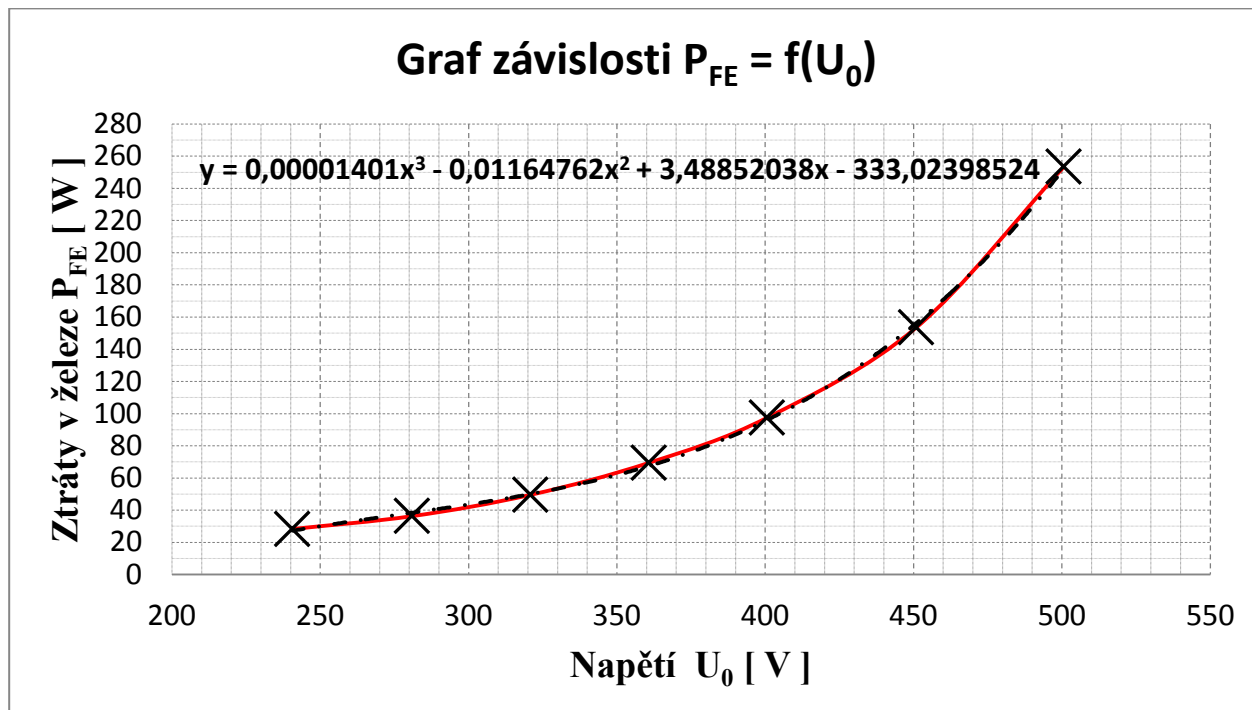
Příklad výpočtu pro žlutě označené hodnoty tabulky 18 (využita rovnice regrese z obrázku 5.6 - pravá část), ostatní hodnoty tabulky měřeny na výkonovém analyzátoru:

$$R_S = 0,0145 \cdot M_Z + 6,8434 = 0,0145 \cdot 3,695 + 6,8434 = \underline{6,897 \Omega} \quad (5.6)$$

Na základě výše uvedených naměřených nebo vypočtených hodnot lze vyčíslit ztráty ve satorovém vinutí a ztráty v rotorovém vinutí (v kleci rotoru). Ztráty ve satorovém vinutí pro jmenovitý chod stroje jsou dány vztahem (dosazována hodnota proudu pro jmenovité zatížení, zeleně označená hodnota tabulky 18):

$$P_S = 1,5 \cdot I_N^2 \cdot R_S = 1,5 \cdot 4,465^2 \cdot 6,95 = \underline{207,84 \text{ W}} \quad (5.7)$$

Pro jmenovitý chod je nutné určit velikost ztrát v železe. Tuto informaci získám za použití grafu na obrázku 5.7, kdy za hodnotu napětí U_0 dosadím hodnotu napětí U_R , která bere v úvahu odporový úbytek napětí ve statorovém vinutí (viz vztah 1.12 v kapitole 1.3.2). Po dosazení hodnot z tabulky 18 pro zvolený zatěžovací bod (v tomto případě pro jmenovitý stav, tj. pro $M_Z=7,368$) bude $U_R = \underline{377,73 \text{ V}}$. Pro tuto hodnotu využiji rovnici regrese z grafu na obrázku 5.7, kde za (U_0) dosadím hodnotu U_R .



Obrázek 5.7– Závislost velikosti ztrát v železe na napětí

Ztráty v železe při jmenovité zátěži budou:

$$P_{Fe} = \underline{77,87 \text{ W}} \quad (5.8)$$

Ztráty v kleci rotoru (pro jmenovitý chod) :

$$P_R = (P_1 - P_S - P_{Fe}) \cdot s = (2656,3 - 207,84 - 77,87) \cdot 0,0351 = \underline{83,2 \text{ W}} \quad (5.9)$$

Poznámka: P_1 a hodnota skluzu byla dosazována z Tabulky 18 (zeleně označeno).

5.4 Určení přídatných ztrát při zatížení a určení účinnosti z nepřímého měření

Zbytkové ztráty ve stroji byly určeny pro každý zatěžovací bod tak, že se od příkonu odečetl výkon, ztráty ve statorovém vinutí při odporu závislém na zatížení, ztráty v železe, ztráty ventilační, ztráty třením a ztráty v rotorové kleci při hodnotě skluzu dané zatížením. Podobně, jako v kapitole 1.3.3 jsem určil velikost korelačního koeficientu k posouzení chyb při měření. Velikost koeficientu vyhověla požadavkům normy, dosahovala hodnoty $\gamma=0,97$. Dále jsem určil velikost sklonu A pro určení hodnoty přídatných ztrát, jako $A=0,438$. Přídatné ztráty při zatížení tedy budou mít velikost:

$$P_{LL} = A \cdot M_Z^2 = 0,438 \cdot 7,368^2 = \underline{\underline{23,78 \text{ W}}} \quad (5.10)$$

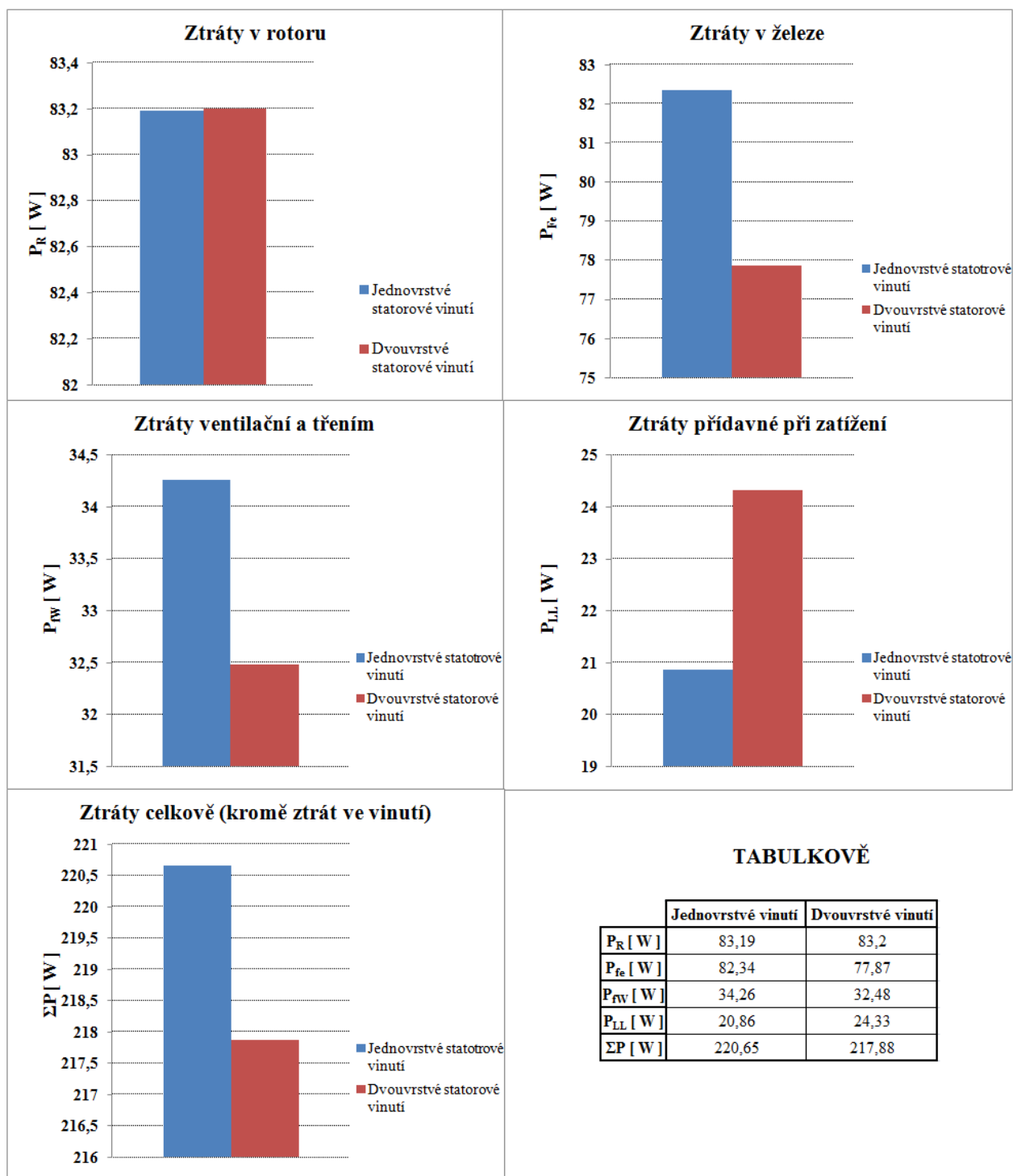
Nyní je možné dle vztahu (1.4) vyčíslit celkovou účinnost z nepřímého měření, jako:

$$\begin{aligned} \eta_n &= \frac{P_1 - P_S - P_R - P_{Fe} - P_{fW} - P_{LL}}{P_1} = \\ &= \frac{2656,3 - 207,84 - 83,2 - 77,87 - 32,48 - 23,78}{2656,3} = \underline{\underline{0,839}} \end{aligned} \quad (5.11)$$

5.5 Zhodnocení dílčích měření motorů

Po vyhodnocení rozdílů měření na stávajícím motoru a na motoru s navrženým dvouvrstvým statorovým vinutím jsem dospěl k výsledku, že celková účinnost navrhovaného motoru klesla o 0,7 % (z parametrů přímého měření) a v případě porovnání parametrů účinností z nepřímého měření o 0,8 %. Tento výsledek, i když ne tak těsný, jsem očekával ihned po změření odporu statorového vinutí, které měl vyšší velikost v případě dvouvrstvého vinutí ($5,41\Omega$ oproti hodnotě $4,496\Omega$ v případě použití jednovrstvého vinutí), a ztráty ve vinutí se tímto více projeví.

Proto jsem se zaměřil na porovnání velikostí ostatních dílčích ztrát ve stroji s tím, že pokud by se technologicky podařilo vyrobit dvouvrstvé vinutí s parametry vodičů uvedených v tabulce 14, ztráty ve vinutí by zůstaly podobné, jako v případě jednovrstvého vinutí. Porovnání velikostí jednotlivých dílčích ztrát v původním asynchronním motoru s jednovrstvým vinutím na statoru a s navrhovaným motorem s dvouvrstvým vinutím je zobrazeno na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8– Porovnání velikostí jednotlivých ztrát, kromě ztrát ve vinutí

Z obrázku 5.8 je zřejmé, že součet dílčích ztrát (přičemž neuvažují ztráty ve vinutí), je menší při použití dvouvrstvého vinutí, avšak se nepotvrdilo zmenšení velikosti přídavných ztrát při zatížení.

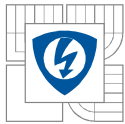
6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo na základě provedení analýzy stávajícího elektrického stroje (konkrétně asynchronní motor, typu TM90-2L, jež vyrábí firma EMP s.r.o. Slavkov u Brna) navrhnout opatření pro zvýšení celkové účinnosti stroje.

V úvodu práce jsem se zaměřil na získání velikostí dílčích ztrát v asynchronním motoru, z měření dle normy EN60034-2-1. Toto úvodní měření probíhalo ve dvou etapách, přičemž u prvního měření nebyly dodrženy podmínky předepsané normou a analyzovaná data vykazovala značnou chybu. Zdroje této chyby byly při druhém měření odstraněny a analýza dat z druhého měření to potvrdila. Velikost výsledné účinnosti z nepřímého měření vykazovala jen o desetinu procenta větší velikost, než účinnost stanovená z dat přímého měření.

V následujícím bodě práce jsem provedl srovnání velikostí jednotlivých ztrát a výsledné účinnosti stroje z parametrů vypočtených analyticky zjednodušeným výpočtem a z parametrů analýzy programu RMxpert. Výsledky pro porovnání jednotlivých parametrů jsou uvedeny v tabulce 8, kapitoly 2 výše v textu práce. V závěrné části kapitoly 2 (konkrétně kapitola 2.8) je uvedeno krátké porovnání jednotlivých parametrů velikostí dílčích ztrát a celkových účinností získaných odlišnými postupy. Největší nepřesnosti je dosaženo při použití empirického vzorce pro výpočet přídatných ztrát, kdy velikost ztrát uvažuji o velikosti 0,5% jmenovitého výkonu (podle již neplatné normy ČSN 350015, která počítala se střední hodnotu přídatných ztrát právě o velikosti 0,5% jmenovitého výkonu), ale ve skutečnosti jsou o 9 W větší, tj. dosahují pouze velikosti poloviny reálně změřených ztrát. Tuto nepřesnost potvrzuje i literatura [2], ve které je uvedeno, že přídatné ztráty při zatížení mohou nabývat u asynchronních motorů s natočenými drážkami na rotoru hodnoty až 2% příkonu.

Ve třetí kapitole práce jsem se věnoval aplikacím opatření pro zvýšení účinnosti motoru, které byly navrhovány v předešlých pracích (semestrální projekt 1. a 2.). Jako první jsem na stroj aplikoval dvouvrstvé vinutí se zkráceným krokem, čímž měl klesnout odpor vinutí a vliv vyšších prostorových harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře na chod stroje. Ukázalo se ale, že při použití tohoto vinutí se vlivem zmenšení činitele vinutí více sytí magnetický obvod stroje (tím se zvětšily ztráty v železe) a musely být přidány 2 závity na cívku, čímž se ale na druhou stranu dosáhlo opět přibližně stejné hodnoty odporu statorového vinutí, jako u stávajícího. Výsledná účinnost se značně nezvýšila, a proto jsem se dále zaměřil na rozbor tvaru statorové drážky. Výsledkem bylo navržení nového tvaru statorových drážek, do kterých se vešel při stávajícím počtu závitů větší vodič a nemuselo tak být použito dvou vodičů různého průměru (menší podíl izolace v drážce oproti původnímu řešení vinutí). Touto změnou klesly ztráty ve vinutí a účinnost nepatrně vzrostla oproti stávajícímu stavu o 0,3%. Jako další změnu jsem provedl použití, postupně 18 a 20 tyčí v kleci rotoru i se změnou materiálu (měď). Z analýzy provedené v programu RMxpert vyplývá, že větší účinnosti je dosaženo při použití 20 tyčí (vzroste o 1,4% v případě použití 18 tyčí a o 1,5% v případě použití 20 tyčí). Pro tyto změny jsem vypočítal rozměry rotorových drážek pro nový počet tyčí. Poslední změna se týkala použití nového materiálu celého magnetického obvodu stroje, přičemž byly nadefinovány materiály M400-50A a M250-50A.

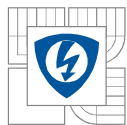


Největší účinnosti potom bylo dosaženo použitím kombinace výše uvedených změn a to konkrétně za použití 47 závitů vodiče o průměru 1 mm (na jednu cívkou), který bude uložen v nově navržených statorových drážkách. V rotoru s klecí nakrátko potom bude použito 20 měděných tyčí a měděného kruhu nakrátko. Jako materiál pro magnetický obvod stroje je nejvýhodnější použít plechy ze železa M250-50A. Při této kombinaci bylo dosaženo při analýze provedené programem RMxpert velikosti účinnosti 88,4%. Celá tato kombinace změn, které byly realizovány pouze programově je popsána na konci kapitoly 3.3.

Všechny výsledky analýz z programu RMxpert jsou vypočteny analyticky a program nepočítá s vlivem vyšších harmonických magnetického pole. To je umožněno až po nasimulování 3D modelu v programu Maxwell 3D, který stroj vypočítá numericky metodou konečných prvků. To jsem provedl v závěru třetí kapitoly a dospěl k závěru, že nejmenších ztrát bude dosaženo při natočení rotorových tyčí o jednu statorovou drážkovou rozteč.

Protože výše uvedená opatření vedoucí ke zvýšení účinnosti stroje nemohla být z časových a především ekonomických důvodů realizována, zaměřil jsem se dále po domluvě s vedoucím diplomové práce na posouzení vlivu dvouvrstvého statorového vinutí na výslednou účinnost stroje. Proto jsem v posledních dvou bodech práce zpracoval technickou dokumentaci pro výrobu dvouvrstvého statorového vinutí a provedl analýzu dat z měření dle EN60034-2-1 na dodaném laboratorním vzorku. Bohužel se při výrobě dvouvrstvého vinutí technologicky nepodařilo vyrobít vinutí z parametrů vodičů, které jsem původně navrhoval, přičemž výrobce použil pro realizaci vinutí menší průměry vodičů. Z analýzy měření bylo v posledním měření zjištěno, že tímto značně narostl celkový odpor vinutí, ztráty ve vinutí a v konečném důsledku klesla výsledná účinnost stroje oproti původní variantě o 0,7%. Ostatní dílčí ztráty v motoru však v součtu nepatrně klesly, což je ukázáno v závěru kapitoly 5.5, kde jsou porovnávána provedená měření na původním a změněném asynchronním motoru.

Hlavní přínos této práce spatřuji v tom, že jsem v kapitole číslo 3 analyzoval a navrhl nové rozměry statorových drážek, do kterých by se navrhované dvouvrstvé vinutí vešlo i s původně navrženými rozměry vodičů a účinnost by tak v tomto případě dále nepatrně vzrostla. Bohužel se při analýze dat z měření ukázalo, že tato změna je tak malá, že dosti záleží také na zpracování naměřených dat, kdy jsem využíval program Microsoft Office Excel a všechna průběžná data musela být zaokrouhlována až na úroveň osmi desetinných míst, aby se ve výsledku projevila změna. Z tohoto usuzuji, že použitím dvouvrstvého vinutí se zvednutí výsledné účinnosti může, ale také nemusí projevit (například vlivem technologie výroby). Jako další perspektivní opatření, které by mohlo vést ke zvýšení celkové účinnosti, bych doporučil provést teplotní analýzu stroje se zaměřením na zmenšení ventilátoru (tedy na zmenšení ventilačních ztrát ve stroji), neboť se z dat prvního měření v úvodní části práce ukázalo, že vinutí je „nadměrně“ chlazeno (při teplotě okolí 20°C je teplota vinutí 104°C). Tedy i v případě teplot v průmyslu, kdy se uvažují teploty okolí 40°C je zde určitá rezerva (asi 20°C) s ohledem na teplotní třídu použité izolace F, kdy tato izolace snese teploty až do 155°C.



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ELEKTRICKÉ STROJE A PŘÍSTROJE, L. Cigánek, M. Bauer, Státní nakladatelství technické literatury n.p., Praha 1955.
- [2] STAVBA ELEKTRICKÝCH STROJŮ, I. P. Kopylov, 1. vydání, Státní nakladatelství technické literatury, Moskva: Mir, 1988
- [3] PŘÍRUČKA SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNIKY, Josef Heřman a kolektiv, SNTL, 1986.
- [4] THE INDUCTION MACHINE HANDBOOK, Ion Boldea, Syed A. Nasar, CRC press, 2002.
- [5] MAGNETICKÉ JEVY A OBVODY VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE, MĚŘÍCÍ TECHNIKE A SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE, Miroslav Patočka, Nakladatelství VUTIUM, 2011.
- [6] EN60034-1: Točivé elektrické stroje – část - 1: Jmenovité údaje a vlastnosti.
- [7] EN60034-2-1: Točivé elektrické stroje – část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinností ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla).
- [8] Náповěda programu RMxppt
- [9] <http://www.enginuitysystems.com/files/3phase10.pdf>
- [10] <http://www.sura.se>
- [11] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37850.pdf>



PŘÍLOHY

P1**Parametry z měření naprázdno (první i druhé měření)**

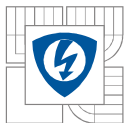
	Nastavené napětí U_0 [V]	Proud I_0 [A]	Příkon na prázdko P_0 [W]	Ztráty ve vinutí na prázdko P_{S0} [W]	Konstantní ztráty P_K [W]
Data z prvního měření	380,370	1,804	145	27,972	117,028
	359,460	1,535	127	20,252	106,748
	340,790	1,345	112	15,549	96,451
	300,140	1,047	89	9,422	79,578
	260,740	0,848	76	6,181	69,819
	199,570	0,616	60	3,261	56,739
	181,170	0,558	56	2,676	53,324
	160,050	0,499	52	2,140	49,860
	140,050	0,457	49	1,795	47,205
	120,940	0,421	46	1,523	44,477
	100,010	0,395	43	1,341	41,659
Data z druhého měření	500,64	6,191	604	303,274	300,726
	450,54	3,609	302	103,059	198,941
	400,6	2,129	172	35,865	136,135
	360,54	1,519	123	18,257	104,743
	320,65	1,167	97	10,776	86,224
	280,59	0,932	80	6,873	73,127
	240,53	0,754	67	4,498	62,502
	200,47	0,606	58	2,906	55,094
	180,35	0,551	53	2,402	50,598
	160,41	0,496	50	1,947	48,053
	140,29	0,442	46	1,546	44,454
	120,35	0,406	43	1,304	41,696
	100,23	0,382	40	1,155	38,845
	80,29	0,386	38	1,179	36,821

Příklad výpočtu pro označené hodnoty tabulky P1:

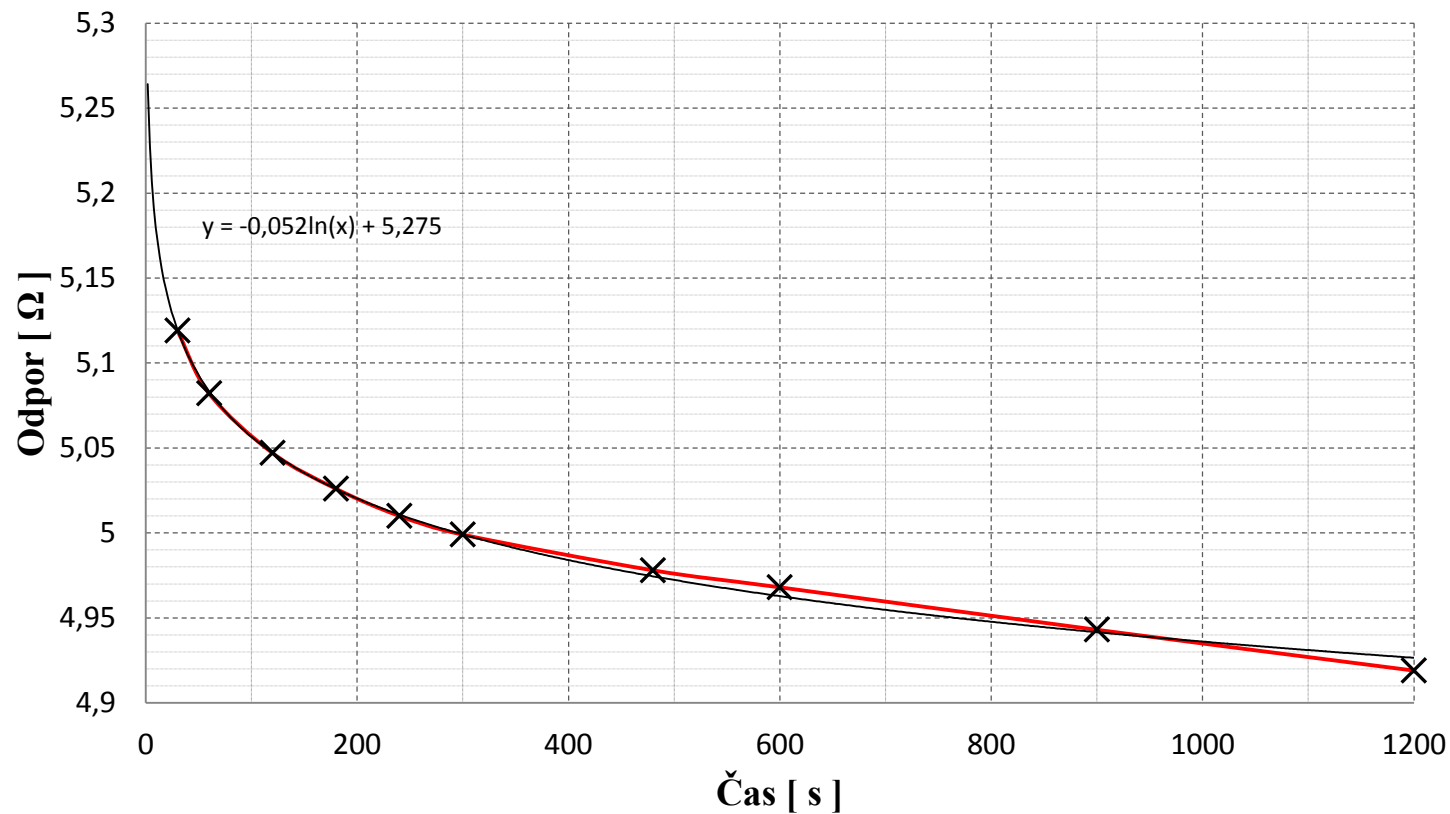
Hodnoty U_0, I_0, P_0 měřeny výkonovým analyzátozem, tj. byly odečteny z dat v programu M-Test 7 na PC, hodnota odporu R_0 viz příloha P2.

$$P_{S0} = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_0 = 1,5 \cdot 2,129^2 \cdot 5,275 = \underline{35,865 \text{ W}}$$

$$P_K = P_0 - P_{S0} = 172 - 35,865 = \underline{136,135 \text{ W}}$$



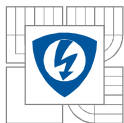
P2



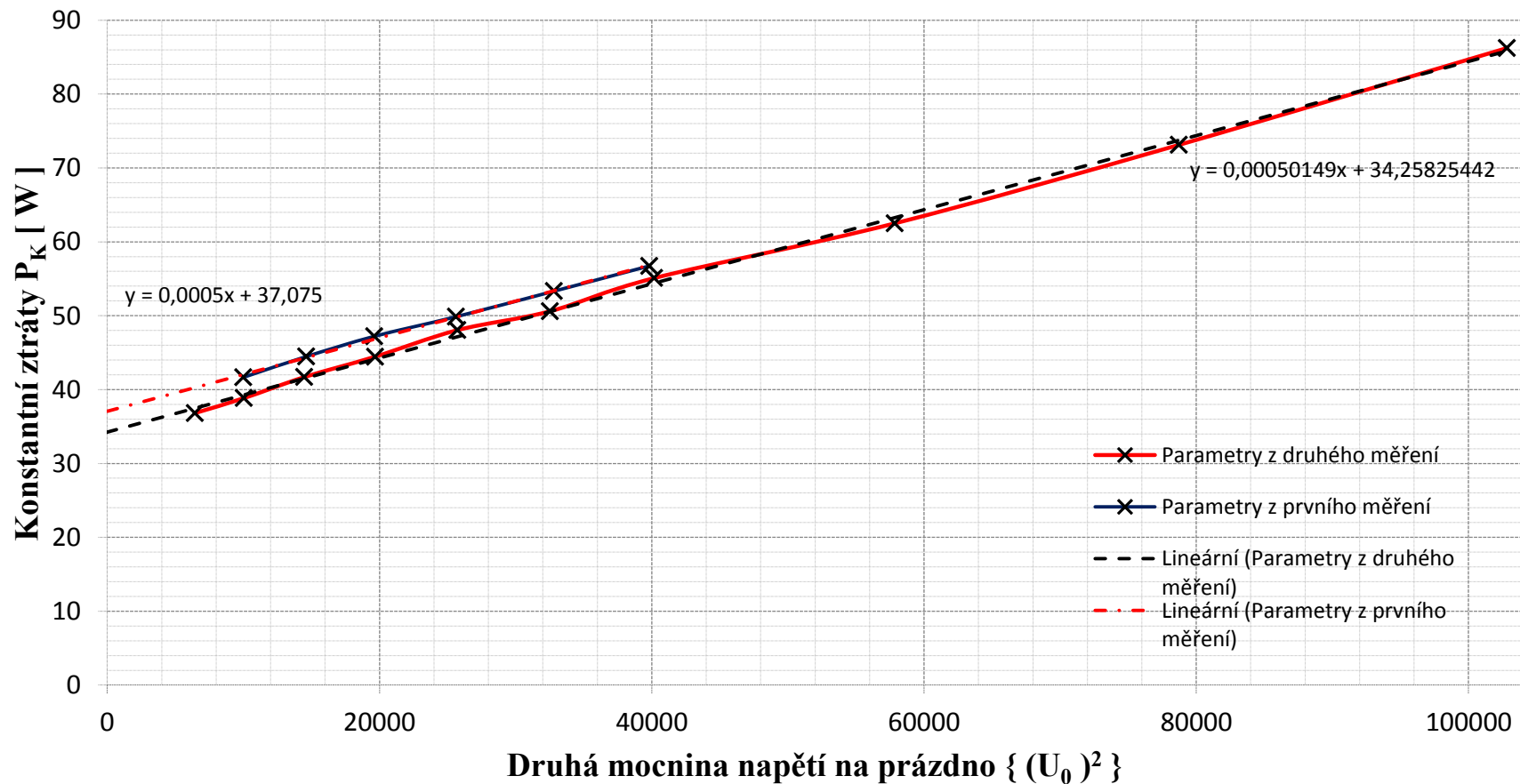
t [s]	R ₀ [Ω]
30	5,119
60	5,082
120	5,047
180	5,026
240	5,01
300	4,999
480	4,978
600	4,965
900	4,943
1200	4,923

Graf závislosti odporu vinutí po zkoušce naprázdno na čase (od vypnutí napájení)

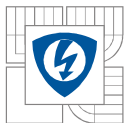
Odpor vinutí po zkoušce naprázdno při čase $t=0$ s je $R_0 = 5,275 \Omega$.



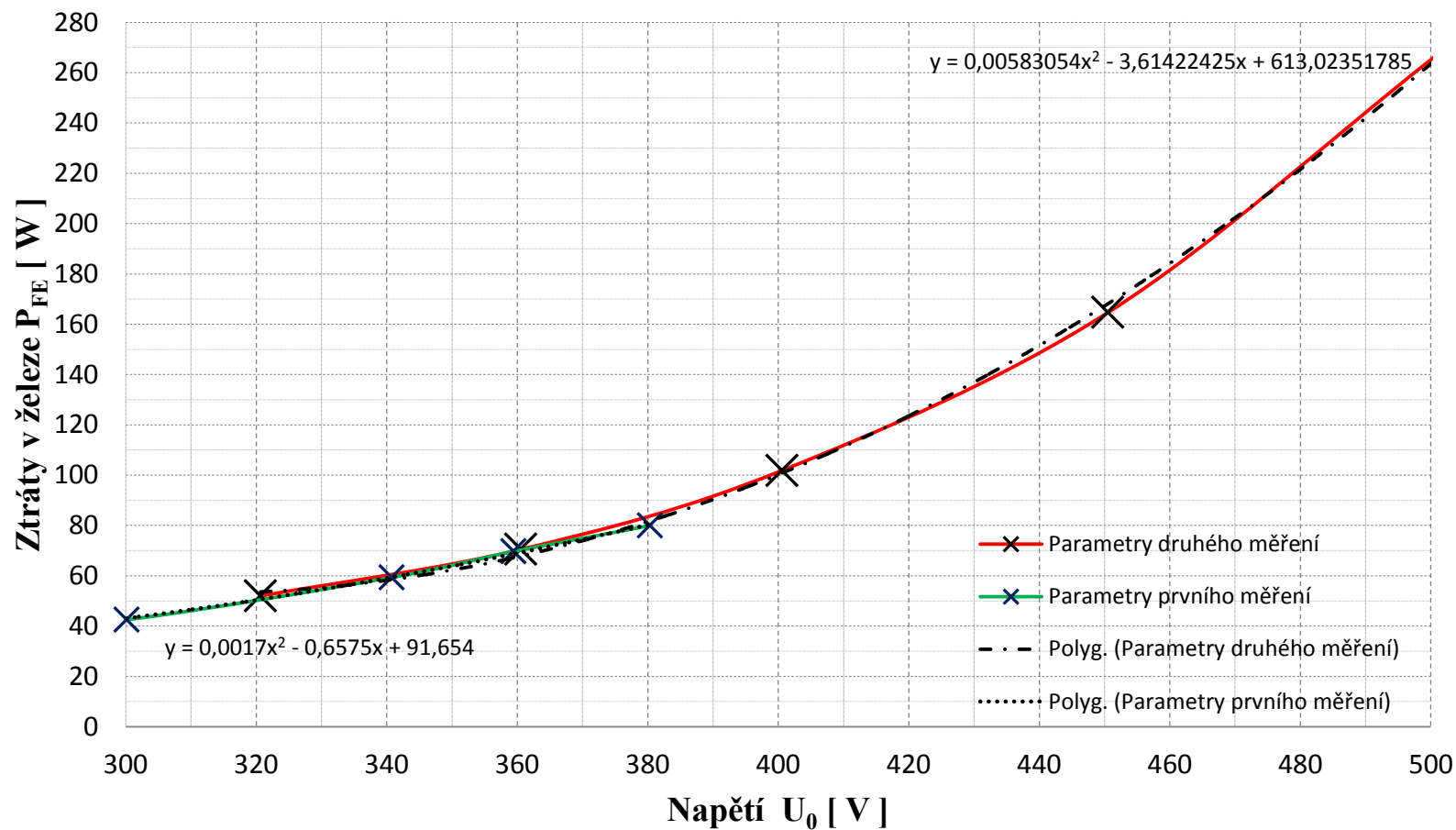
P3



Graf závislosti konstantních ztrát (P_K) na druhé mocnině napájecího napětí naprázdno pro obě měření

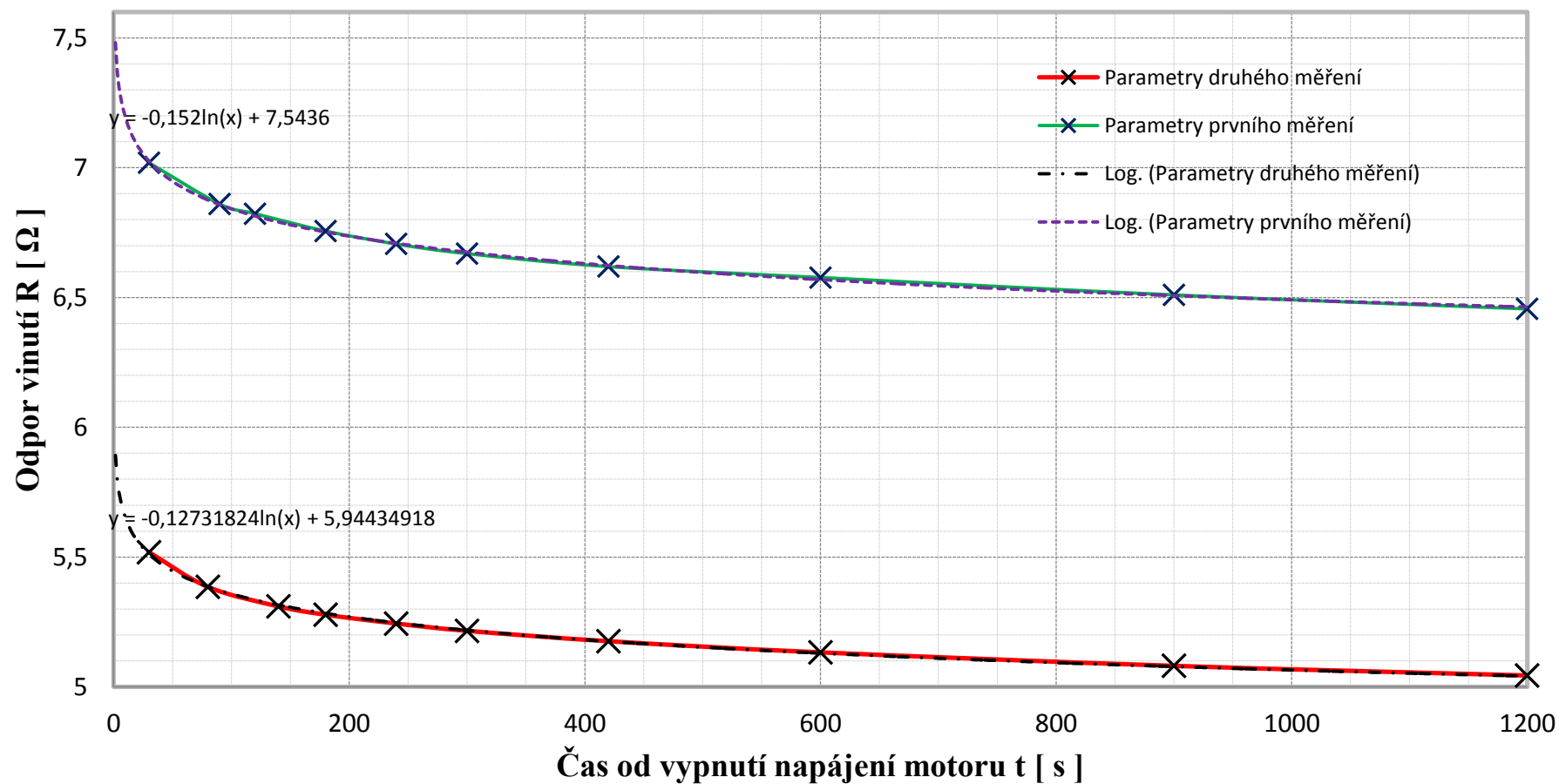


P4

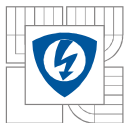


Graf závislosti ztrát v železe (P_{FE}) na napájecím napětí naprázdno U_0 .

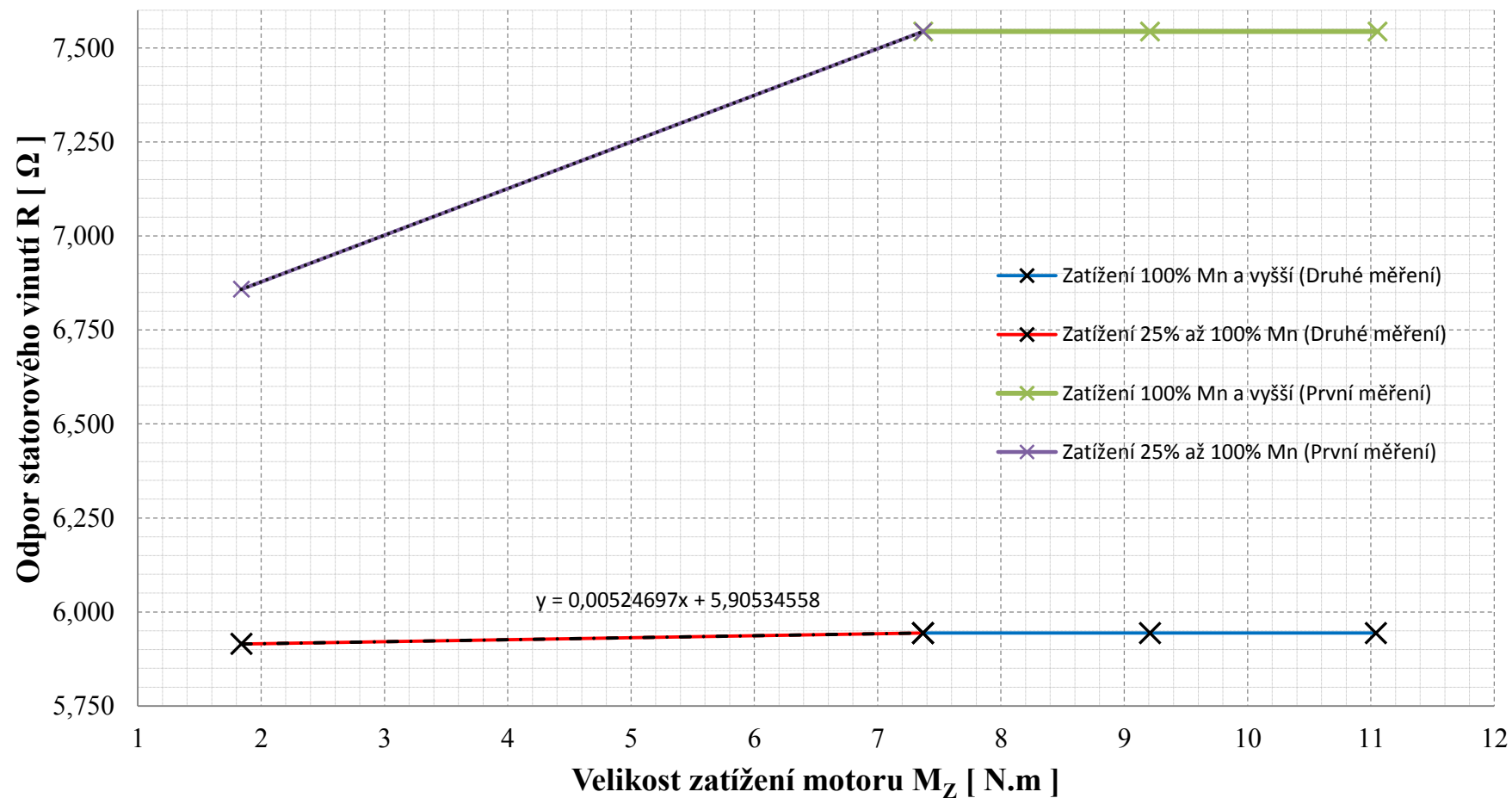
P5



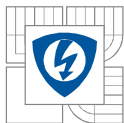
Graf závislosti velikosti statorového odporu na čase od vypnutí napájení stroje.



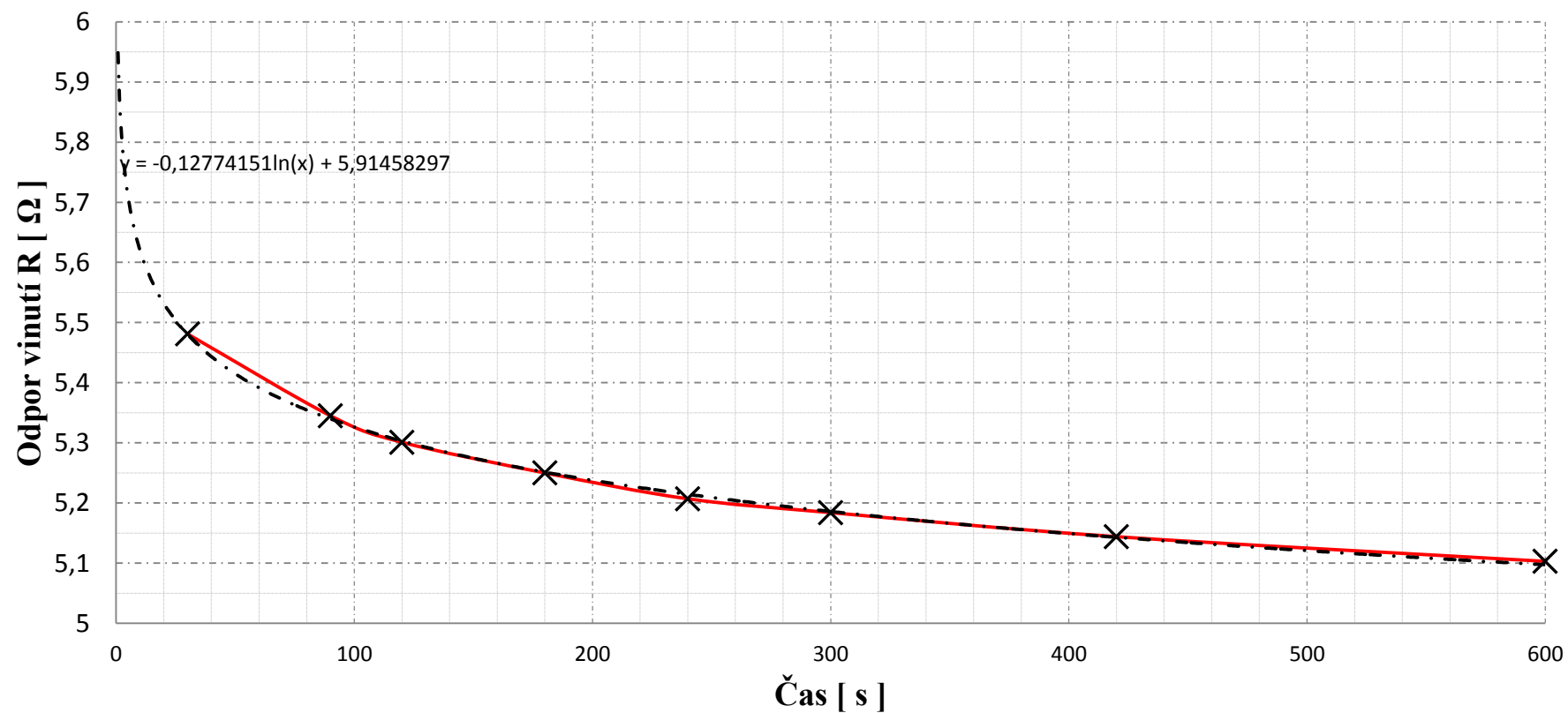
P6



Graf závislosti odporu statorového vinutí na zatížení

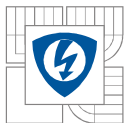


P7

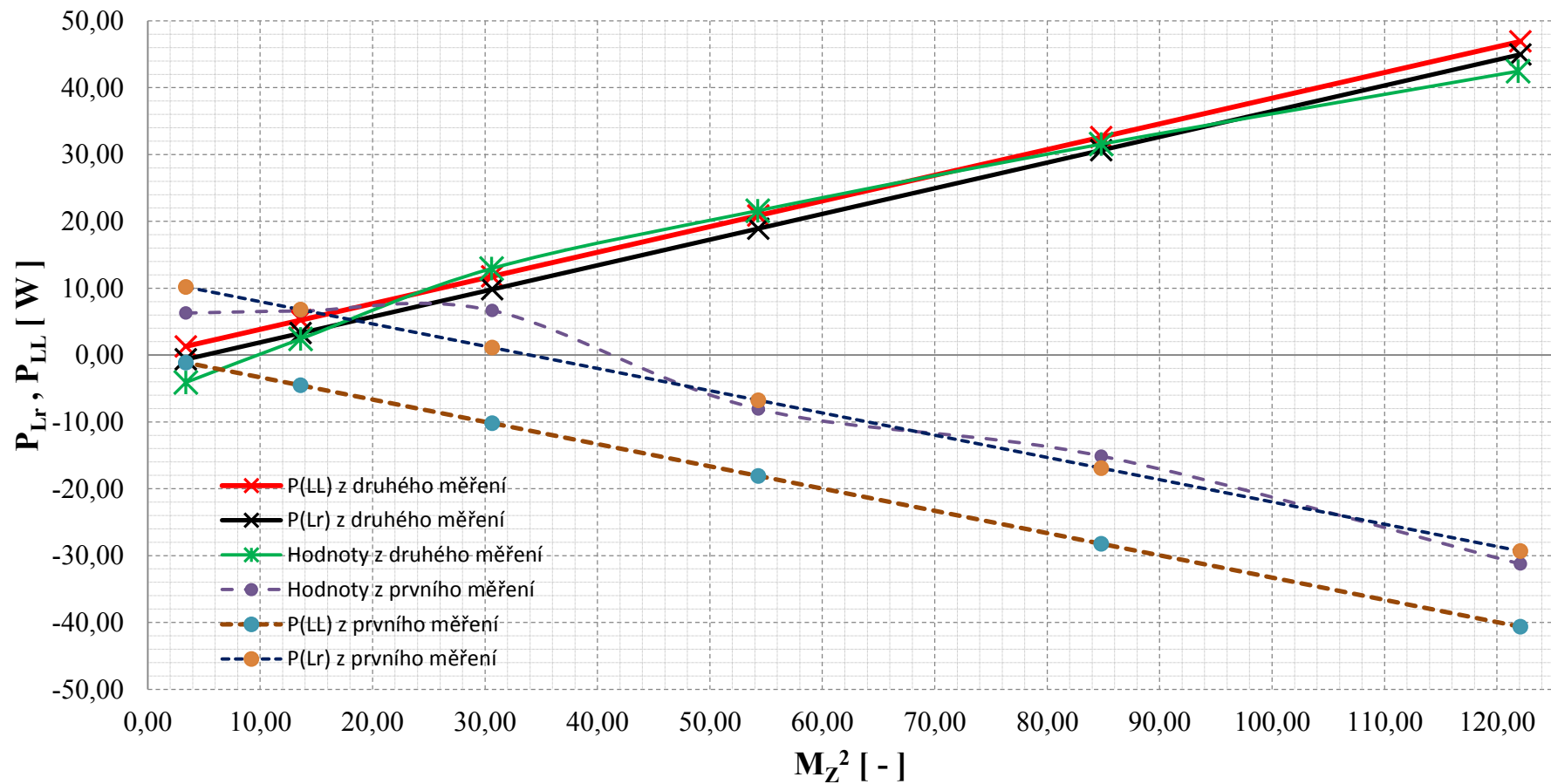


Graf závislosti velikosti odporu statorového vinutí na čase od vypnutí napájení po zatěžovací zkoušce

Odpor statorového vinutí odečtený po nejnižším zatížení je $R_{S25\%} = 5,915 \Omega$.



P8



Regresní analýza zbytkových ztrát pro určení velikosti přídavných ztrát při zatížení z průběhu (P_{LL})

P9

Typical data for SURA® M800-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz
0,1	0,05	0,17	84,5
0,2	0,18	0,44	107
0,3	0,43	0,76	121
0,4	0,70	1,12	133
0,5	1,01	1,52	145
0,6	1,35	1,97	156
0,7	1,72	2,46	168
0,8	2,13	3,00	180
0,9	2,56	3,60	194
1,0	3,05	4,27	209
1,1	3,59	5,04	228
1,2	4,20	5,96	254
1,3	4,91	6,95	304
1,4	5,70	8,49	402
1,5	6,60	11,9	660
1,6	7,54	25,2	1480
1,7	8,30	67,4	3710
1,8	8,83	151	7300

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg 6,60

Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg 3,05

Anisotropy of loss, % 5

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T 1,65

H = 5000 A/m, T 1,74

H = 10000 A/m, T 1,85

Coercivity [DC], A/m 100

Relative permeability at 1.5 T 1810

Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$ 23

Yield strength, N/mm² 300

Tensile strength, N/mm² 415

Young's modulus, RD, N/mm² 210 000

Young's modulus, TD, N/mm² 220 000

Hardness HV5 (VPN) 130



Parametry plechů pro konstrukci statorového a rotorového magnetického obvodu
(převzato z [9]).